le Scienze

Gennaio 2019
euro 4,90

edizione italiana di Scientific American

Il problema impossibile

Una questione fondamentale di meccanica quantistica rientra nella categoria delle affermazioni di cui non si può dimostrare se sono vere o false

Innovazione
Le dieci tecnologie da tenere d'occhio nel 2019

Paleontologia
Che cosa mangiavano i nostri antenati

Neuroscienze
Mappare i circuiti cerebrali con il virus della rabbia

in copertina

Sommario

Dopo tre anni di lavoro e con un articolo di 146 pagine tre matematici hanno dimostrato l'indecidibilità di un problema fondamentale della fisica quantistica, quello del gap spettrale (*Illustrazione di Mark Ross Studios*)

gennaio 2019 numero 605

Marcus Yam/Getty Images

10

17

91

SCIENZA NEWS

fcafotodigital/iStock (*sedano*); cortesia NASA/Goddard/Università dell'Arizona (*asteroide*); cortesia Yutaka Kamada (*JT-60SA*)

IN Pink Lady®

ABBIAMO SENSO DI RESPONSABILITA!

Per l'ambiente
I nostri frutticoltori si impegnano a realizzare processi produttivi responsabili, riducendo giorno dopo giorno l'impatto delle loro attività sulla natura.

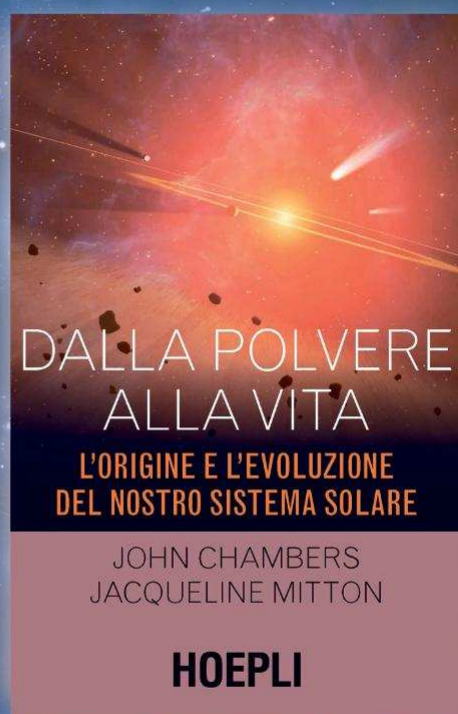
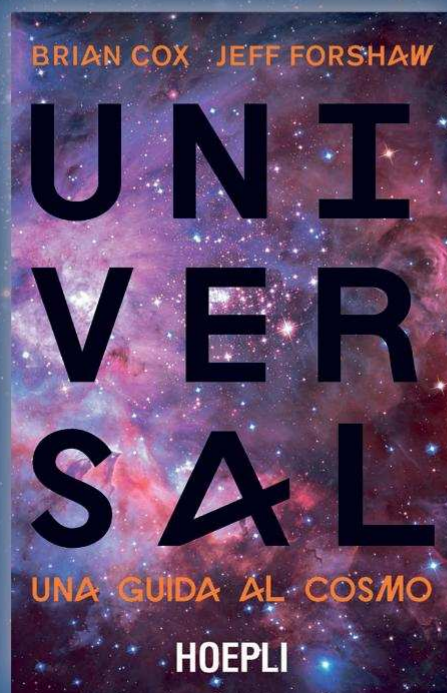
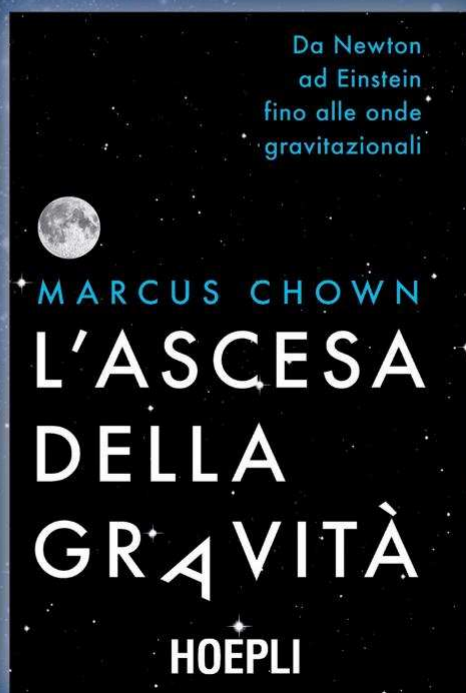
Per la qualità
Le nostre mele vengono selezionate per le loro qualità, senza sprechi, e sono sottoposte a controlli periodici dall'organismo di certificazione Bureau Veritas.

Per i nostri produttori
Un modello che remunera equamente i 2600 produttori aderenti e garantisce la giusta redditività grazie alla sottoscrizione di contratti annuali.

Per i nostri terreni
La nostra produzione viene coltivata su terreni speciali selezionati per il clima e la qualità del suolo. Contribuisce inoltre a mantenere un'attività sociale ed economica locale e a tutelare i paesaggi rurali.

Molto più di una mela

di Marco Cattaneo

Editoriale

Al campionato mondiale di slalom tra i cavilli

Tra fondi sempre più esigui e burocrazia asfissiante, come muore la ricerca italiana

Il fondo ordinario del Consiglio nazionale delle ricerche, quel CNR fondato nel 1923 da Vito Volterra, è pari a 543 milioni di euro. Alla fine di ottobre – secondo i calcoli di Vito Mocella, ricercatore dell'Istituto per la microelettronica e microsistemi di Napoli e rappresentante del personale nel Consiglio di amministrazione dell'ente – considerando gli aumenti contrattuali e i fondi vincolati alla stabilizzazione dei precari, la spesa per il personale ammonta al 98,7 per cento del fondo ordinario.

Ma c'è di più. Il CNR ha attestato in bilancio 83 milioni di euro di spese correnti che non sono coperte dal finanziamento ordinario. Si prevede che questi 83 milioni dovranno essere coperti, per il 2019, da prelievi forzosi sui progetti di ricerca. Come osservava Mocella, è come se si chiedesse agli agenti di polizia in servizio sulle volanti di pagare la benzina di tasca loro.

All'inizio di dicembre l'approvazione di un paio di emendamenti alla legge di bilancio ha garantito un aumento degli stanziamenti di circa 35 milioni di euro. Che sono stati salutati da qualche inguaribile ottimista come un rilancio della ricerca. In realtà quei 35 milioni bastano a malapena a coprire i fondi vincolati per le stabilizzazioni, ma non avanza nemmeno un centesimo per i 18 milioni degli aumenti salariali dovuti al rinnovo contrattuale. Morale, al bilancio del CNR mancano ancora 50 milioni per pagare stipendi, utenze, riscaldamento. Quanto alla ricerca, se proprio uno ci tiene deve trovarseli i fondi. E da quelli scalare la quota per pagare l'elettricità.

In questo nostro breve film dell'orrore sfumiamo a nero e ci troviamo in una scena del tutto diversa, all'apparenza. Siamo sul sito web dell'Università di Parma, dove alla fine di ottobre sono state pubblicate le *Linee guida per il processo di richiesta missione e richiesta rimborso*. Tre corposi file, complessivamente una sessantina di pagine, in cui viene descritta in dettaglio la procedura per essere autorizzati a una missione, come la partecipazione a un congresso, per esempio, un'attività che dovrebbe essere ordinaria amministrazione, per uno scienziato.

Per farsi un'idea, sia pure molto superficiale, della perizia bizantina con cui sono state redatte, al paragrafo 3.4 si legge: «Il processo informatizzato prevede le seguenti 5 tipologie di flussi autorizzatori (corrispondenti a 5 diversi tipi di richiesta missioni in U-WEB Missioni): DELRE – DELegati del REttore; FASTR – Fondi di Altra STRuttura di ateneo; FPROG – Fondi di PROGetto; FPSTR – Fondi di Propria STRuttura; FFORM – Fondi per la FORMazione». I codici per le singole spese sono 21.

Per essere autorizzato a una missione e rientrare di tutte le spese, insomma, un professore o un ricercatore deve vincere il campionato mondiale di slalom tra i cavilli. A meno che... «In caso di missioni senza spese a carico dell'Ateneo occorre barrare l'opzione Missione senza spese nella sezione MISSIONE».

E qui mi fermo. Perché delle magagne della ricerca italiana ha già parlato Roberto Defez sul numero di dicembre. A quelle, come si vede da questo scorcio aneddotico, si aggiunge l'agghiacciante riduzione della scienza a pubblica amministrazione, del ricercatore a contabile, in un crescendo rossiniano che ha come esito la morte della ricerca.

The end, titoli di coda, e buon anno anche a voi.

Allegato a richiesta con il numero di febbraio di «Le Scienze» *Le 17 equazioni che hanno cambiato il mondo*, un libro di Ian Stewart

Se la matematica è rivoluzionaria

Un'equazione può cambiare il corso della storia? Per quanto possa sembrare una domanda provocatoria, che implica un ruolo cruciale della matematica nelle vicende umane, la risposta è affermativa. In effetti, è difficile immaginare il mondo di oggi se nel XIX secolo lo scienziato britannico James Clerk Maxwell non avesse stabilito delle relazioni matematiche tra i fenomeni del magnetismo e dell'elettricità in una serie di quattro equazioni che hanno previsto l'esistenza delle onde elettromagnetiche.

Non è stato solo un risultato scientifico epocale, le equazioni di Maxwell hanno costituito la prima importante unificazione di forze naturali, ma si è trattato anche di una pietra miliare nello sviluppo di tecnologie di cui oggi non possiamo fare a meno: dalla trasmissioni radiotelevisive al Wi-Fi, per fare due esempi. E proprio Maxwell è uno dei protagonisti di *Le 17 equazioni che hanno cambiato il mondo*, libro di Ian Stewart allegato a richiesta con «Le Scienze» di febbraio al prezzo di 9,90 euro oltre a quello della rivista, che segna la seconda uscita della nuova collana *Frontiere*, con libri di scienza tra i più interessanti tra quelli pubblicati di recente da case editrici italiane.

I segreti della natura

Professore emerito di matematica alla Warwick University, autore di numerosi *bestseller* divulgativi, Stewart accompagna i lettori in un viaggio particolare nella storia della matematica e nella sua profonda influenza sulle nostre società. Le protagoniste, come recita il titolo, sono equazioni grazie a cui l'umanità ha fatto passi da gigante. Per ciascuna Stewart illustra il percorso che ha portato alla sua elaborazione e l'importanza nelle varie applicazioni che da essa sono state sviluppate, magari non sempre nell'immediato. Perché le equazioni possono svelare i segreti più intimi della natura, possono stabilire schemi con cui interpretare il mondo e magari intervenire per modificarlo a piacimento, ma può essere necessario del tempo per capire fino in fondo come sfruttare la potenza dei segreti svelati.

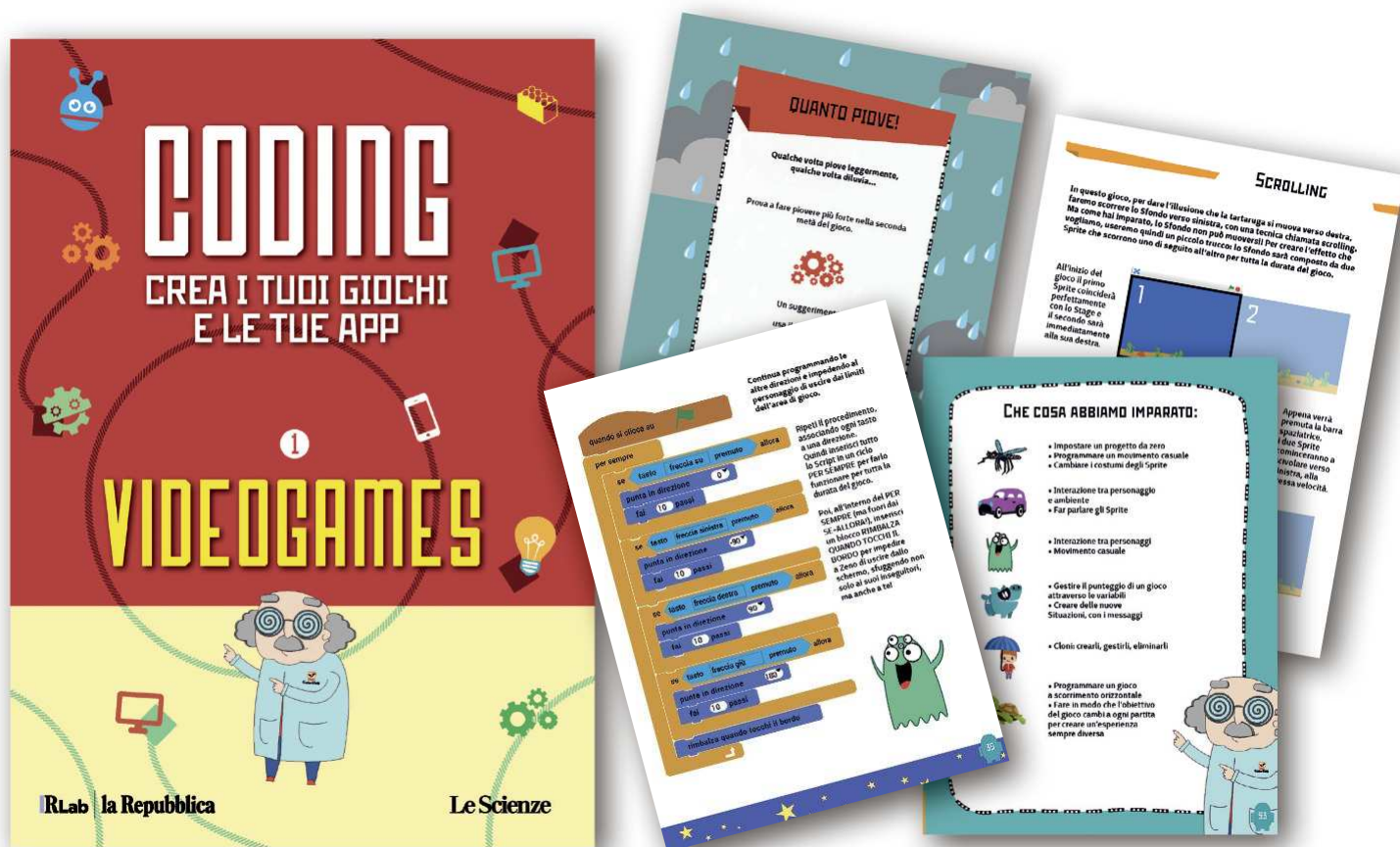
Anzi, nelle storie raccontate da Stewart, spesso tra la definizione di un'equazione e le sue applicazioni passano decine e decine di anni, se non secoli.

Capisaldi della conoscenza

Il viaggio nella storia delle equazioni inizia con una relazione conosciuta da tutti gli studenti: il teorema di Pitagora. Nella sua semplicità, questo teorema di oltre 2000 anni fa dimostra una relazione fondamentale tra i lati del triangolo rettangolo (la notazione sotto forma di equazione arrivò molto tempo dopo Pitagora, con lo sviluppo dell'algebra), che è stata fondamentale per lo sviluppo della cartografia e della navigazione.

Proseguendo su un'ideale linea temporale verso il presente il viaggio termina con l'equazione di Black-Scholes. Questo nome, non dirà nulla alla maggior parte delle persone, tuttavia l'equazione in questione è al centro degli andamenti più o meno turbolenti dei mercati finanziari del recente passato. (Per inciso, uno degli autori, Myron Scholes nel 1997 ha ricevuto il Nobel per l'economia per aver sviluppato questa equazione.)

Tra l'inizio e la fine del viaggio, il lettore può incontrare altri capisaldi della conoscenza umana: dall'equazione della gravità di Newton all'equazione più famosa del mondo, $E = mc^2$ di Albert Einstein, dalla radice quadrata di -1 all'equazione di Schrödinger. E potrà apprezzarne l'importanza, concludendo che sì: un'equazione ha il potere di cambiare il mondo.

Programmare per divertirsi

Tutti (o quasi) sanno usare uno *smartphone* o un *tablet*, o un computer. Ma non tutti (anzi non molti) sanno dare istruzioni a questi dispositivi in modo da trasformarli in strumenti con cui dare vita a proprie idee e, per esempio, creare da giochi nuovi e originali. Per saper parlare a smartphone e compagni è necessario conoscere la loro lingua e oggi questo è possibile in modo semplice e anche divertente. Basta imparare il *coding*, una lingua composta da simboli che permette di programmare telefonini, tablet e personal computer.

Proprio al coding è dedicata la nuova iniziativa editoriale, una collaborazione tra l'inserto RLab di «la Repubblica» e «Le Scienze». A partire da febbraio, ogni mese in edicola a 9,90 euro in più oltre al prezzo della rivista o del quotidiano sarà possibile acquistare volumi illustrati che introdurranno i lettori più piccoli e le loro famiglie ai concetti base del mondo della programmazione. Ogni libro affronta progetti di difficoltà crescente, ciascuno dei quali porterà a realizzare giochi per computer e un'applicazione. Il prodotto finale sarà comunque un gioco, perché l'intenzione della collana è di imparare a programmare senza però perdere la dimensione ludica del percorso formativo. All'interno di ciascun volume sarà possibile trovare tutte le istruzioni e i link per scaricare i materiali e le grafiche da usare.

L'obiettivo della collana *Coding* è incoraggiare i lettori a non subire passivamente la tecnologia, ma a considerarla per quello che è: un potente strumento per dare vita alle proprie idee. Buona programmazione.

PIANO DELL'OPERA

FEBBRAIO
Progetta i tuoi videogames

MARZO
Costruisci la tua sala giochi

APRILE
Anima le tue storie

MAGGIO
Progetta i tuoi giochi a quiz

GIUGNO
Gioca con animazioni, musica e colori

Lo sviluppo di un reattore a fusione commerciale passa anche per un prototipo in costruzione in Giappone con un importante contributo italiano

La via giapponese alla fusione nucleare

Generare sulla Terra l'energia che alimenta il Sole, quella della fusione nucleare. È un traguardo perseguito da decenni e che forse fra qualche decennio si realizzerà se andrà in porto il piano ambizioso la cui principale tappa attuale è ITER: il gigantesco reattore in costruzione in Francia grazie a una collaborazione globale, per dimostrare che una marea di sfide tecniche, organizzative e politiche possono essere vinte, e una macchina a fusione può produrre più energia di quella che consuma. Tuttavia, per giungere a un reattore commerciale non basterà ITER, servono altre ricerche e altre prove: come quelle di JT-60SA, il reattore euro-giapponese in costruzione in Giappone. Con importanti partner italiani, fra cui Consiglio nazionale delle ricerche, ENEA e varie aziende, che hanno realizzato, fra gli altri contributi, dieci delle 20 bobine superconduttive che produrranno il campo magnetico per confinare il plasma al cuore del sistema. Ce ne parla il direttore del progetto, Yutaka Kamada.

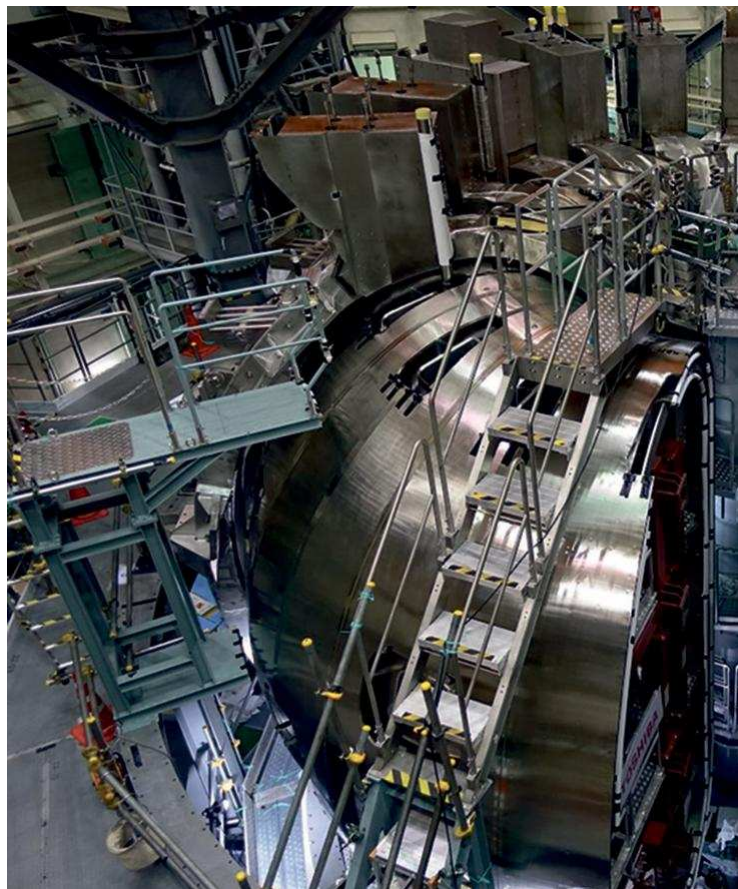
Cortesia Yutaka Kamada (*JT-60SA in questa pagina e Kamada pagina a fronte*)

Qual è il percorso previsto verso la fusione?

La strategia va da ITER a DEMO, un reattore dimostrativo, e poi ai reattori commerciali. ITER userà il combustibile reale dei futuri reattori commerciali, cioè deuterio e trizio, per produrre dieci volte più energia di quella consumata per periodi di 400 secondi, ma il calore generato non sarà usato per produrre elettricità. DEMO sarà il vero reattore a fusione, capace di generare qualche centinaio di megawatt elettrici per molti mesi di seguito e, a differenza di ITER, di autoprodurre tutto il trizio che consuma, grazie alle reazioni fra litio nel suo mantello e neutroni prodotti dalla fusione.

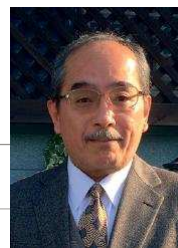
Oltre a ITER che cosa occorrerà per progettare DEMO?

Unione Europea e Giappone hanno concordato il Broader Approach, un insieme di tre progetti complementari a ITER, in via di realizzazione in Giappone. I materiali dei futuri reattori dovranno resistere ai neutroni ad alta energia generati dalla fusione (molto più energetici di quelli prodotti dalla fissione), con flussi che saranno circa dieci volte maggiori rispetto a ITER.

Quindi, per realizzare le prove di irradiazione con neutroni così energetici, stiamo costruendo l'International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF). Poi ci sarà l'International Fusion Energy Research Centre, che include un centro di ricerca sui materiali del mantello, un centro di simulazioni con supercomputer, e uno per sviluppare sistemi di trasferimento dati di alta velocità e sicurezza. E infine c'è JT-60SA (Japanese Tokamak 60 Super Advanced), un reattore complementare a ITER.

E che cosa aggiunge a quello che può fare ITER?

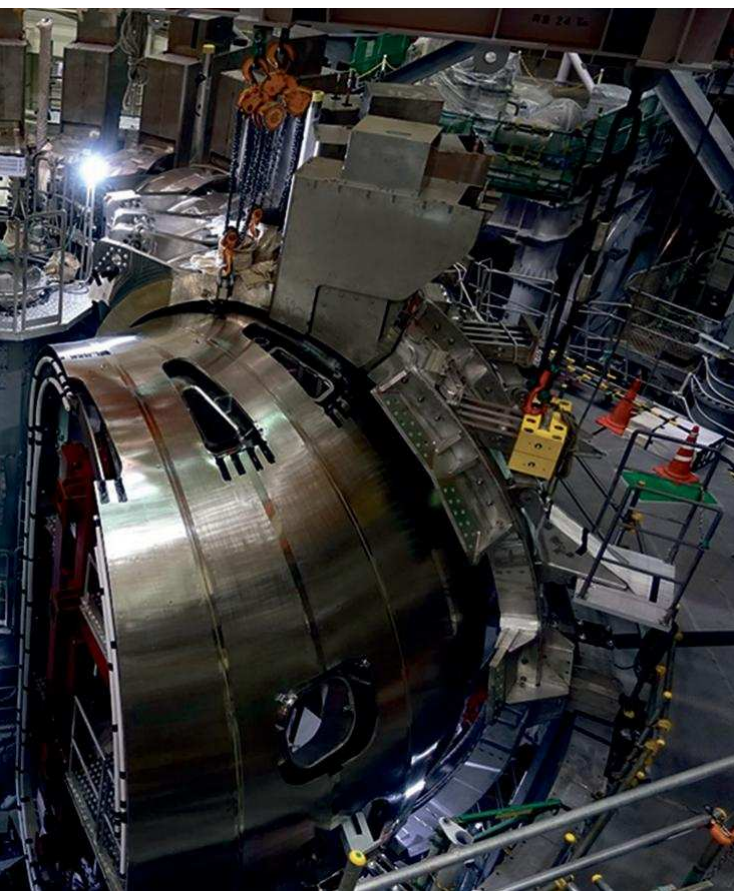
JT-60SA ha tre missioni. Innanzitutto aiuta a realizzare ITER, perché è un dispositivo più piccolo e flessibile in cui fare ricerca su fenomeni rilevanti per ITER stesso, come il confinamento del plasma. Poi lo complementa verso la costruzione dei reattori dimostrativi, perché può mantenere il plasma a pressioni più alte, indispensabili per poter progettare un reattore più compatto e contenere i costi.

Infine, farà crescere la nuova generazione di ricercatori del settore. JT-60SA è un dispositivo flessibile che si presta a lavorare per tentativi ed errori, permettendo ai giovani di sperimentare idee nuove, mentre ITER deve procedere il più possibile spedito e senza intoppi.

di Giovanni Sabato

CHI È

YUTAKA KAMADA

È *senior principal researcher* della Japan Atomic Energy Agency, vicedirettore generale del Naka Fusion Institute, e project leader e Japanese project manager di JT-60SA.
Dopo essersi laureato in ingegneria nucleare all'Università di Tokyo, ha lavorato sul reattore a fusione JT-60 (il fulcro della ricerca giapponese sulla fusione e precursore di JT-60SA, che sarà costruito dotando JT-60 di nuove apparecchiature). Qui ha effettuato esperimenti sulla fisica dei plasmi e diretto gruppi di lavoro.
Ha collaborato anche con l'International Tokamak Physics Activity (ITPA), in cui dal 2001 al 2008 ha guidato un gruppo; dal 2007 è il rappresentante giapponese nell'ITPA Coordinating Committee.

Banco di prova. Il nome è ostico, ma JT-60SA ha un ruolo notevole nello studio di fenomeni rilevanti per il reattore ITER.

Oltre a risolvere problemi tecnologici, vi aspettate anche scoperte scientifiche?

Crediamo di sì. Il plasma di fusione è un sistema altamente non lineare, in cui diversi livelli di turbolenze e fluttuazioni interagiscono e decidono il comportamento dell'intero sistema. Vi si verificano molti fenomeni di grande interesse non solo per la fusione ma per la fisica del plasma in generale. Alcuni fisici del plasma solare, per esempio, sono già coinvolti nell'unità di ricerca di JT-60SA, che grazie alla sua struttura flessibile può dotarsi di volta in volta dei sistemi diagnostici necessari alle diverse indagini.

Se ITER non raggiungesse gli obiettivi attesi, JT-60SA sarebbe comunque utile?

Nella strategia attuale non si può sviluppare la fusione senza ITER, che userà il combustibile reale dei futuri reattori. Ma se ITER non desse gli esiti sperati, JT-60SA potrà suggerire come migliorare le prestazioni del plasma in ITER stesso o in DEMO.

A che punto sono i lavori? Ci sono stati imprevisti o critiche?

Critiche di fondo, a quanto ne so, non ce ne sono state. Com'è inevitabile, in dieci anni di costruzione abbiamo avuto tanti piccoli contrattempi, ma nessun intoppo serio. L'imprevisto maggiore è stato il terremoto giapponese del 2011, ma per fortuna il Naka Fusion Institute che ospita JT-60SA non ha subito seri danni e nessuno si è fatto male. Grazie ai grandi sforzi degli istituti e delle imprese coinvolte in Giappone e in Europa, inclusi partner italiani come ENEA, consorzio RFX o l'azienda ASG, il progetto procede secondo i piani: il montaggio sarà completato a marzo 2020 e il primo plasma è previsto per settembre 2020.

ITER è anche un faticoso esperimento di cooperazione internazionale. JT-60SA sta affrontando problemi simili?

Francamente sì, all'inizio abbiamo avuto complicazioni, perché bisognava assemblare in un'unica macchina tanti componenti prodotti da aziende diverse in paesi differenti. Ma ne siamo venuti a capo coinvolgendo tutti i colleghi nel cosiddetto Integrated Project Team, basato sulla «mutua fiducia» fra i membri e sulla rapida condivisione delle informazioni. Ora non temo nuove complicazioni. In più, devo ringraziare il *project manager* europeo Pietro Barabaschi e il suo vice Enrico Di Pietro per la loro capacità di integrare l'intera squadra europea, e i colleghi di molti istituti europei che nella produzione dei componenti hanno sempre pensato all'efficienza del loro futuro assemblaggio in Giappone, cosa non facile da fare. Perciò il montaggio ora procede senza intoppi.

JT-60SA è stato definito «un premio di consolazione» del Giappone per non aver ottenuto ITER. Lo trova ingeneroso?

So che la scelta politica è stata definita così, ma sul piano scientifico un apparecchio simile è indispensabile, per i motivi detti. Tant'è che in Giappone il comitato governativo per la fusione ne aveva stabilito la necessità nel 2000, cinque anni prima che si decidesse dove fare ITER. E i governi europei e giapponese stanno investendo vaste risorse. Quindi non è un premio di consolazione.

Un dispositivo monitora lo stato di salute di api da miele e permette di intervenire in caso di anomalie in modo da sostenere la produttività

Un alveare tecnologico per la tutela delle api

Passione e intraprendenza; amore per le api e un'idea precisa di quale sarà il futuro della tutela della salute animale. Su questi due binari si muove la storia di 3Bee, *start-up* nata nel 2017 per cercare di risolvere il problema della moria di api, soprattutto quelle da miele, e aiutare quindi gli apicoltori a ottenere il massimo dagli alveari. Il tutto grazie alla tecnologia.

Niccolò Calandri e Riccardo Balzaretti, rispettivamente amministratore delegato e direttore scientifico dell'azienda, si conoscono fin da quando sono ragazzi. Le loro strade si separano per via degli studi: il primo studia ingegneria elettronica e durante il dottorato trascorre un periodo al Massachussetts Institute of Technology facendo ricerca nel campo della sensoristica per i sistemi satellitari; il secondo è biologo e trascorre un periodo all'Università di Dublino per effettuare analisi sulle nanoparticelle. Ma quando i due si incontrano di nuovo, in Italia, alla fine del loro periodo di studio all'estero, Balzaretti parla all'amico della sua passione per l'apicoltura e della sua preoccupazione per lo stato di salute delle api.

«Diamo spesso per scontato quello che siamo abituati da sempre a vedere, per esempio le api. Così non ci rendiamo conto della loro importanza per l'ecosistema, dei rischi concreti per la loro salute e delle conseguenze che questo potrebbe portare non solo a loro ma a tutti noi», sottolinea Calandri.

Già, perché a causa della presenza di alcuni parassiti, importati dall'Estremo oriente ormai vent'anni fa, dei cambiamenti climatici e della presenza sempre più massiccia di pesticidi nell'ambiente, la mortalità delle api si aggira ogni anno intorno al 40 per cento. «Le percentuali variano a seconda della posizione geografica o delle condizioni di una particolare zona, ma in ogni caso sono molto alte e gli apicoltori sono in difficoltà», continua l'ingegnere. «Per non parlare della perdita per l'ecosistema: le api sono responsabili dell'80 per cento dell'impollinazione e quindi garantiscono il benessere anche di altre specie, compresa la nostra».

La leva dei servizi

Ecco quindi la soluzione: un alveare tecnologico che sia capace di tenere sotto controllo tutte le variabili fondamentali per la salute delle api e che permetta agli allevatori di agire in tempo reale per modificare la situazione.

Hive-Tech è un dispositivo da installare all'interno e sotto gli alveari, che si alimenta grazie a un piccolo pannello fotovoltaico ed è quindi autosufficiente, e monitora temperatura, peso, umidità, rumori e odori. Sono parametri chiave per capire come stanno le api e come procede la produzione del miele. «Riusciamo a registrare e interpretare i suoni emessi dagli insetti che corrispondono ai messaggi che si scambiano fra di loro e con la regina», spiega Calandri. «Anche da questi rumori è possibile stabilire se le api, per esempio, sono vittima di un'infestazione. Il nostro è una specie di Grande Fratello». Questi parametri sono registrati e trasmessi quattro volte al giorno a una piattaforma *cloud* in modo che gli apicoltori possano consultarli ed estrapolare statistiche e dati, che possono essere salvati e studiati. Grazie all'*app* dedicata, poi, scaricabile su *smartphone* o *tablet*, i produttori possono ricevere messaggi di allerta ogni volta che il sistema rileva un'anomalia.

Cortesia 3Bee (*foto in questa pagina e nella pagina a fronte*)

Il dispositivo permette l'installazione di un sistema di geolocalizzazione in modo da avere sempre sotto controllo il proprio alveare. Addirittura, grazie ai servizi offerti da 3Bee, gli apicoltori possono prevedere quanto miele produrranno, e tramite il servizio «Adotta un alveare» possono venderlo al prezzo di det-

di Letizia Gabaglio

Piccolo Grande Fratello. Hive-Tech di 3Bee è un dispositivo da installare dentro e sotto gli alveari, ed è autosufficiente grazie a pannelli solari.

LA SCHEDA - 3BEE

Azienda fondata nel 2017

Persone di riferimento: Niccolò Calandri (CEO), Roccardo Balzaretti (direttore scientifico)

Sito: www.3bee.it **Mail:** info@3bee.it

Numero di brevetti: 1

Dipendenti-collaboratori: 5 assunti e 5 in assunzione

taglio prima ancora di produrlo. Infatti, con il monitoraggio in tempo reale è possibile ottimizzare la produzione in maniera personalizzata perché ogni alveare si trova in un posto diverso, con un meteo specifico, con fioriture che variano.

Oggi gli apicoltori fanno i loro calcoli sulla base di calendari delle fioriture e sulle previsioni meteorologiche ma si tratta di informazioni spesso non sufficientemente precise. «Il nostro modello di business si basa sulla vendita di servizi, non sulla vendita del dispositivo», spiega l'ingegnere. «I dati generati, infatti, hanno bisogno di essere interpretati e di poter essere fruiti nella maniera più semplice e intuitiva possibile».

I giovani imprenditori – sono trentenni - hanno idee ben precise su come procedere: secondo loro, a fare la differenza non è l'idea che si ha ma come si riesce a metterla in pratica, a portarla su un mercato variabile e competitivo in maniera veloce. Da quando hanno cominciato a pensare alla soluzione all'arrivo sul mercato di Hive-Tech, per esempio, è passato solo un anno e oggi il prodotto è venduto – anche grazie all'*e-commerce* – in Italia, Svizzera eRomania (uno dei paesi che produce più miele in Europa), e il prossimo anno 3Bee è pronto a scendere in campo anche in Grecia, Spagna e Francia. Ad acquistarlo sono grandi produttori ma anche semplici appassionati, con pochi alveari da controllare.

«Abbiamo ovviamente dei *competitor* ma la differenza la fanno i servizi che offriamo perché quando i produttori si rendono conto che grazie al nostro dispositivo le api stanno bene e producono di più non vogliono più fare a meno di Hive-Tech», spiega Calandri.

La forza di questa idea ha convinto diverse giurie di premi per l'innovazione: nel 2016 la Fondazione Barilla ha selezionato Hive-Tech fra i dieci progetti migliori al mondo sul fronte della sostenibilità, nel 2017 l'arnia tecnologica ha vinto il Premio Gaetano Marzotto, nel 2018 i giovani imprenditori si sono aggiudicati la competizione per start-up promossa da TIM.

«Siamo in un momento di espansione e stiamo anche cercando figure tecniche per ampliare la nostra squadra. In futuro infatti vorremmo spostare l'attenzione anche ad altri allevamenti mantenendo la nostra filosofia: fare in modo che gli animali stiano bene e quindi possano produrre», conclude Calandri. «È un cambio di prospettiva indispensabile: le soluzioni chimiche, di prevenzione o di cura, non sono più sostenibili, anche perché il problema della resistenza ai farmaci è sempre più diffuso».

Mucche, maiali, polli, ma anche pesci. Sono decine le specie che possono essere controllate in tempo reale in modo che non si ammalino e che vivano in condizioni ideali. Grazie alla passione e alla tecnologia.

di Piergiorgio Odifreddi

professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e *visiting professor* alla Cornell University di Ithaca (New York)

Le metamorfosi di Maxwell

La matematica ha fornito gli strumenti per generalizzare le equazioni di Maxwell e la fisica le ha restituito il favore

Le equazioni che James Clerk Maxwell pubblicò nel 1865, armonizzando fra loro le leggi sull'elettricità e sul magnetismo scoperte da Coulomb, Gauss, Ampère e Faraday, costituirono la prima unificazione di due forze fisiche apparentemente separate, elettricità e magnetismo, in un'unica forza chiamata elettromagnetismo.

Le equazioni di Maxwell si rivelarono essere perfettamente compatibili con la teoria della relatività. Innanzitutto, le onde elettromagnetiche da esse previste risultarono viaggiare nel vuoto alla velocità della luce (*c*), che comparì inaspettatamente nelle equazioni sotto forma dell'inverso della radice quadrata del prodotto delle costanti di permittività elettrica (ε_0) e magnetica (μ_0). Inoltre, nel 1905 Albert Einstein dimostrò che le equazioni di Maxwell sono intrinsecamente relativistiche, e risultano invarianti rispetto alle trasformazioni di Lorentz.

Nel mondo dei quanti

Dal canto suo, anche la meccanica quantistica risultò compatibile con le equazioni di Maxwell, grazie alla lunga elaborazione collettiva dell'elettrodinamica quantistica (QED) culminata nelle equivalenti formulazioni di Tomonaga, Schwinger e Feynman, che valsero loro il premio Nobel per la fisica nel 1965. In particolare, in questa nuova teoria risultò essere fondamentale una simmetria di scala (*gauge*) che lascia invariate le equazioni di Maxwell quantizzate, e ha la struttura matematica di un gruppo commutativo chiamato *U*(1): cioè, il gruppo moltiplicativo dei numeri complessi unitari.

L'idea di estendere le equazioni di Maxwell mantenendone la simmetria di scala, ma cambiando il gruppo a seconda della forza considerata, fu proposta da Yang e Mills nel 1954: da allora la teoria dei gruppi divenne uno strumento essenziale per lo sviluppo della fisica teorica. Il salto di qualità consistette nel passare dal gruppo commutativo *U*(1) a quello non commutativo *SU*(2): cioè, il gruppo moltiplicativo dei quaternioni unitari.

In origine Yang e Mills speravano di trattare in tal modo la forza nucleare forte, responsabile del confinamento dei quark e della coesione dei nuclei atomici. Ma in seguito si scoprì che così si ottiene invece una generalizzazione delle equazioni di Maxwell per la forza nucleare debole, responsabile del decadimento radioattivo: una teoria chiamata QFD, perché fa intervenire i cosiddetti «sapori» (*flavor*) dei *quark*, che è valsa a Glashow, Salam e Weinberg il premio Nobel per la fisica nel 1979. Inoltre, moltiplicando i due gruppi *U*(1) e *SU*(2) si ottiene un'unificazione delle due forze elettromagnetica e nucleare debole nella cosiddetta forza elettrodebole.

La corretta generalizzazione delle equazioni di Maxwell per la forza nucleare forte deriva invece dall'invarianza di scala relativa al gruppo *SU*(3), che è una versione più complicata di *SU*(2): una teoria chiamata cromodinamica quantistica (QCD), perché fa intervenire i «colori» dei *quark*, valsa a Gross, Wilczek e Politzer il Nobel per la fisica nel 2004. Inoltre, moltiplicando i tre gruppi *U*(1), *SU*(2) e *SU*(3) si ottengono le equazioni del modello standard.

Cortesie reciproche

Se la matematica ha fornito alla fisica gli strumenti per generalizzare le equazioni di Maxwell, la fisica ha restituito il favore alla matematica. L'uso delle equazioni invarianti rispetto al gruppo *SU*(2) ha infatti permesso a Donaldson di classificare le superfici topologiche a quattro dimensioni, e di vincere la medaglia Fields nel 1986.

E uno dei sette problemi del millennio, con un premio di un milione di dollari in palio, riguarda invece il difficile calcolo esatto della massa della particella più leggera prevista delle equazioni invarianti rispetto al gruppo *SU*(3).

di Elena Castellani

professore associato, Dipartimento di filosofia,
Università di Firenze

Metodo scientifico e società

Sulla rilevanza delle competenze nell'uso sociale della scienza

Siamo in un periodo in cui accade sempre più spesso che, nel trattare dell'impatto di questioni di natura scientifica sulla società, la competenza acquisita non sia più ritenuta necessaria. Si pensa che basti informarsi su qualche sito web e seguire qualche divulgatore per diventare esperti e poi diffondere le proprie opinioni o, peggio, imporle (nel caso se ne abbia facoltà). Gli scienziati vengono tacciati di arroganza, mentre imperversano sulla scena pubblica personaggi improvvisati, che a volte hanno anche il potere di fare grandi danni.

Le ricadute di questo atteggiamento – purtroppo diffuso in una parte non piccola dell'opinione pubblica – sono ben evidenti, come dimostrano le vicende legate ai vaccini e più in generale a questioni di salute pubblica, per ricordarne una tipologia.

E di tutto questo risentono in modo notevole anche le politiche in fatto di ricerca scientifica, con scelte e tagli che la danneggiano profondamente.

Il rapporto tra scienza e società è un tema classico della filosofia della scienza: è naturale che lo sviluppo della conoscenza scientifica sia da sempre accompagnato da una riflessione sulla metodologia seguita e sul suo impatto sociale, economico e politico.

La riflessione metodologica

La discussione su questi argomenti è ovviamente molto ampia. In questa rubrica mi voglio limitare a ricordare alcune grandi figure della storia del pensiero filosofico e scientifico, che non solo hanno segnato il dibattito su questo tema, ma al ruolo sociale della scienza hanno finalizzato la propria impostazione metodologica.

Si tratta del «padre» del metodo induttivo in epoca moderna, Francis Bacon (per noi, Francesco Bacone) con il suo *Novum Organum* (1620), e di tre tra i più autorevoli protagonisti del mondo inglese dell'Ottocento – John Herschel, William Whewell e James Mill – le cui opere metodologiche sono un modello da tenere presente ancora oggi.

Per Bacone, la riflessione metodologica era un aspetto fondamentale della sua mastodontica impresa di «una totale Restaurazione delle scienze, delle arti e di ogni umano sapere», nel quadro d'una visione del mondo centrata sull'ideale di scienza come potenza e opera collettiva, che permettesse di dominare la natura e quindi migliorare le condizioni di vita del genere umano. Avere a disposizione un metodo chiaro e collettivamente fruibile era quindi una condizione essenziale per raggiungere questo ideale.

Ispirazione a un ideale

Herschel, Whewell e Mill, per quanto ognuno nel proprio modo, si ispirarono esplicitamente a questo ideale di Bacone. Nell'intento di promuovere un nuovo fiorire scientifico e sociale, sentirono l'esigenza di adeguare, con le loro opere, la metodologia baconiana agli sviluppi della conoscenza scientifica e della riflessione filosofica nei due secoli che erano trascorsi dagli inizi della scienza moderna.

In particolare, il poderoso *Sistema di Logica* (1843) di Mill era strettamente funzionale ai suoi propositi di riforma della filosofia morale e politica, e più in generale, della società stessa. La sua analisi dei «principi dell'evidenza e dei metodi dell'investigazione scientifica», per usare parte del sottotitolo dell'opera, aveva come motivazione principale quella di contrastare la filosofia «intuizionista». Cioè una filosofia in cui Mill ravvisava «il grande supporto intellettuale di false dottrine e cattive istituzioni», in quanto strumento per rassicurare le persone su verità senz'altro fondamento che le proprie credenze.

Tanto tempo è trascorso da allora, e molte cose sono cambiate: ma questi grandi autori ci dicono ancora cose attuali e a molti, oggi, gioverebbe una lettura attenta dei loro lavori.

di Giorgio Manzi

ordinario di paleoantropologia alla Sapienza Università di Roma;
socio corrispondente dell'Accademia Nazionale dei Lincei

Un torace da Neanderthal

La prima ricostruzione 3D di una gabbia toracica neanderthaliana ha fornito informazioni inattese

Un gruppo internazionale ha realizzato la prima ricostruzione virtuale in 3D della gabbia toracica dello scheletro di un Neanderthal. Qualcosa che si potrebbe fare con il «nostro» uomo di Altamura e un giorno (auspicabilmente) si farà, se e quando saremo in grado di estrarre questo reperto straordinario, per stato di conservazione e completezza, dalle concrezioni carsiche che ancora lo inglobano (a ben 25 anni dalla scoperta, compiuti il 3 ottobre dell'anno scorso). Lo si potrà così analizzare con le più aggiornate tecniche di analisi digitale e di morfometria geometrica e funzionale.

Al momento, la nuova ricerca, pubblicata un paio di mesi fa su «Nature Communications», si è basata sul Neanderthal più completo attualmente disponibile: Kebara 2. E fornisce informazioni inedite e da tempo attese, che fanno luce su come *Homo neanderthalensis* si muoveva e respirava.

Dal Monte Carmelo

Kebara 2 è lo scheletro di un giovane maschio sui trent'anni, antico di circa 60.000 anni, che venne scoperto nel 1983 in connessione anatomica in una grotta del Monte Carmelo, il promontorio a sud di Haifa, in Israele. Per quanto sia privo del cranio e di buona parte degli arti inferiori, conserva quasi tutti gli elementi del tronco e delle braccia, oltre alla mandibola. Lo si conosce anche per la presenza dello ioide, il piccolo osso del collo che per la prima volta suggerì (era il 1989) che i Neanderthal probabilmente avevano un tratto vocale simile al nostro e che dunque, almeno su questo piano, erano in grado di articolare una qualche forma di linguaggio.

Precedenti ricerche avevano già esaminato caratteristiche della gabbia toracica di Kebara 2. Per esempio, nel 2005 molti elementi di questo scheletro sono stati usati all'American Museum of Natural History di New York, insieme a quelli di altri scheletri parziali, per ottenere la ricostruzione che oggi è l'unica completa di un Neanderthal (la si può acquistare da una ditta specializzata, a circa 14.000 dollari). Guardando questo scheletro a confronto con uno di *H. sapiens*, a parte le evidenti particolarità morfologiche del cranio, le maggiori differenze con l'anatomia moderna che si notano a prima vista sono proprio nella conformazione della gabbia toracica del Neanderthal, svasata verso le ampie ossa dell'anca.

Polmoni capienti

Il dibattito che seguì a questa prima ricostruzione viene oggi messo a tacere dal nuovo studio, che appare accurato e, dunque, affidabile. I ricercatori hanno usato sia osservazioni dirette sui resti scheletrici sia scansioni tomografiche di vertebre, costole e ossa pelviche, ricostruite ed esaminate con un programma di manipolazione 3D. Hanno quindi effettuato un'analisi morfometrica comparativa con tomografie di uomini attuali.

La nuova ricostruzione rivela che il torace di Kebara 2 è significativamente diverso, ma non più grande, rispetto a quello moderno, più largo nel suo segmento inferiore, che si associa a un bacino molto ampio, e comporta anche una colonna vertebrale più invaginata. Mostra cioè che le costole si collegano alla colonna vertebrale curvando verso l'interno, spingendo questa e tutta la cavità toracica in avanti, cosa che permette alla colonna vertebrale del Neanderthal di inclinarsi solo leggermente all'indietro, con una curvatura lombare che appare modesta rispetto alla conformazione umana moderna.

Inoltre, il torace è più largo del nostro nella parte inferiore, suggerendo un diaframma più grande e quindi una maggiore capacità polmonare, la qual cosa sembrerebbe in relazione con gli ambienti freddi in cui i Neanderthal si sono evoluti nel corso del Pleistocene.

Nuove ricerche possono ora partire da queste solide basi.

di Amedeo Balbi

professore associato di astronomia e astrofisica
al Dipartimento di fisica dell'Università di Roma Tor Vergata

Destinazione Bennu

La sonda OSIRIS-REx della NASA punta a scendere su un asteroide e a riportare a Terra campioni di materiale

Circa 4,6 miliardi di anni fa, il collasso di una nube di gas e polveri provocò l'accensione di una protostella che, in seguito, sarebbe diventata il nostro Sole. Nel frattempo, all'interno del disco di materiale rimasto a girarle attorno, si formavano piccoli accumuli di metalli, ghiacci e molecole organiche, che avrebbero fornito il materiale di costruzione dei pianeti. Più tardi, dopo l'accensione del Sole, molto di questo materiale rimasto inutilizzato sarebbe piovuto sui pianeti appena formati, bombardandoli in modo violento.

Una parte, però, sopravvisse sotto forma di asteroidi. Uno di essi, un oggetto sferoidale di circa 500 metri di diametro, iniziò un lungo viaggio che lo portò, miliardi di anni più tardi, a orbitare vicinissimo al nostro pianeta. Nel 1999 fu avvistato dagli astronomi, e adesso sta per essere raggiunto da una sonda lanciata dalla NASA nel 2016.

Una capsula temporale

La sonda si chiama OSIRIS-REx, un acronimo che sta per Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, Security-Regolith Explorer. Il nome in realtà richiama il dio egizio Osiride, colui che avrebbe portato l'agricoltura e la fertilità nella valle del Nilo, ma anche il giudice dell'oltretomba. Vita e morte, come a ricordare il doppio ruolo degli asteroidi nella storia di un pianeta quale il nostro: portatori di materiale organico e di acqua, ma anche, potenzialmente, di distruzione.

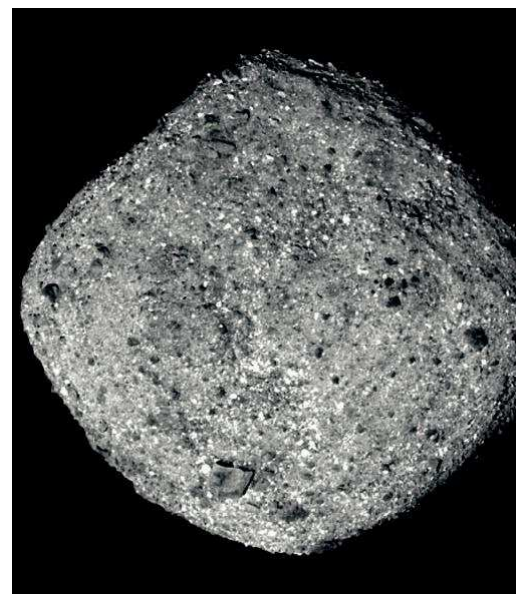
In effetti, la meta di OSIRIS-REx, l'asteroide Bennu (nome anch'esso legato alla mitologia egizia, e per la precisione al dio della creazione e della rinascita), è al momento uno tra gli asteroidi potenzialmente più pericolosi tra quelli noti. La sua orbita interseca quella terrestre, e i migliori calcoli della sua traiettoria stimano a 1 su 2700 il rischio di collisione con il nostro pianeta tra il 2175 e il 2199. Il botto sarebbe grosso, con un'energia di circa 1200 megatoni. Ci sono però molte incognite su una previsione a così lunga scadenza. Bennu potrebbe tranquillamente finire distrutto molto prima che il rischio si concretizzi.

Nel frattempo, ci interessa di più quello che possiamo capire studiandolo. Bennu è infatti una specie di capsula temporale rimasta integra dalla formazione del nostro sistema solare. L'osservazione da Terra ci dice già che Bennu è un asteroide di tipo piuttosto raro, primitivo e ricco di molecole organiche e di minerali che contengono acqua. È quindi del tipo giusto per aiutarci a rispondere a domande che potrebbero avere a che fare con l'origine della vita sul nostro pianeta: chi ha portato acqua e molecole organiche sulla Terra? Erano presenti già durante la formazione o sono arrivate in un secondo tempo?

È anche del tipo giusto per tentare una cosa che non è mai stata fatta prima: ovvero scendere sulla sua superficie, prelevare del materiale, e riportarlo a Terra per analizzarlo. Un asteroide più piccolo avrebbe ruotato troppo rapidamente per tentare l'aggancio, ma Bennu ruota su se stesso all'incirca ogni quattro ore, e ha una forma piuttosto regolare, con una sporgenza lungo l'equatore che lo fa somigliare a una trottola.

Andata e ritorno

Se tutto andrà bene, quando leggerete questa rubrica OSIRIS-REx dovrebbe essere entrata in orbita a circa 1 chilometro di distanza da Bennu. A quel punto, la sonda inizierà a studiare in dettaglio la superficie dell'asteroide, in cerca di un punto dove scendere, probabilmente nel 2019.

Dopo aver toccato il suolo, tirerà fuori un braccio robotico e raccoglierà tra i 60 grammi e i 2 chilogrammi di materiale, mettendoli in una capsula. Nel 2021 lascerà l'asteroide, farà rotta per la Terra e finalmente, nel 2023, spedirà nell'atmosfera la capsula con il suo prezioso carico di indizi sul nostro passato.

Oggetto celeste sferoidale. Un'immagine di Bennu scattata da OSIRIS-REx a circa 80 chilometri di distanza dall'asteroide. La sonda della NASA ha raggiunto Bennu il 3 dicembre scorso, rilevando molecole d'acqua nei minerali che si trovano sulla superficie.

Cortesia NASA/Goddard/Università dell'Arizona

VULCANOLOGIA

La ricarica dei Campi Flegrei

Il supervulcano italiano sarebbe in una fase di accumulo di magma

Mimmo Frassineti/AGF

Sempre attivo. Fumarole della solfatara di Pozzuoli, nella caldera dei Campi Flegrei. Uno studio su una ventina di eruzioni del passato suggerisce che questo supervulcano potrebbe essere vicino, in tempi geologici, a una nuova eruzione devastante.

Con le dovute proporzioni, i Campi Flegrei sono la Yellowstone d'Italia: un colossale supervulcano attivo, abitato tuttavia da un milione e mezzo di persone e fortemente urbanizzato. Sebbene le due grandi eruzioni che ne hanno plasmato la struttura risalgano a 39.000 e 15.000 anni fa, in tempi storici la loro attività è sempre stata vivace, alternando periodi di relativa calma con numerose piccole eruzioni. La caldera è inoltre interessata da fenomeni di vulcanismo secondario come terremoti locali e sollevamenti del suolo, che negli ultimi anni sono diventati più frequenti, tanto da convincere la Protezione civile a innalzare nel 2012 il livello di allerta.

Uno studio pubblicato su «Science Advance» da Francesca Forni, oggi ricercatrice alla Nanyang Technological University di Singapore, e colleghi di altri enti tra cui l'Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia e «Sapienza» Università di Roma, ipotizza che i Campi Flegrei potrebbero essere alla vigilia, in termini di tempi geologici, di una nuova eruzione di vasta portata. Poiché dalla composizione chimica dei minerali è possibile risalire alle condizioni in cui si sono formate le rocce che li includono, i ricercatori hanno sottoposto ad analisi petrologica le rocce prodotte nelle ultime 23 eruzioni, comprese le due più catastrofiche.

La stima dei cambiamenti critici nella temperatura del magma e il suo contenuto di acqua ha permesso di ricostruire la genesi eruttiva della caldera, mentre l'applicazione di modelli temomeccanici ha suggerito l'esistenza di una ciclicità millenaria nell'accumulo di magma nella crosta superiore nonché della pressione esercitata dai gas all'interno della camera magmatica. Superato il punto di non ritorno, si verifica una grande eruzione e il ciclo ricomincia.

Le rocce prodotte durante l'ultima eruzione, che segnò la nascita di Monte Nuovo nel 1538, sono risultate simili a quelle che hanno alimentato l'attività nelle fasi iniziali delle due grandi eruzioni.

Da allora, i Campi Flegrei sarebbero entrati in una fase di accumulo che dura tuttora e che potrebbe portare, in un futuro imprecisato, a una nuova e devastante eruzione.

Davide Michielin

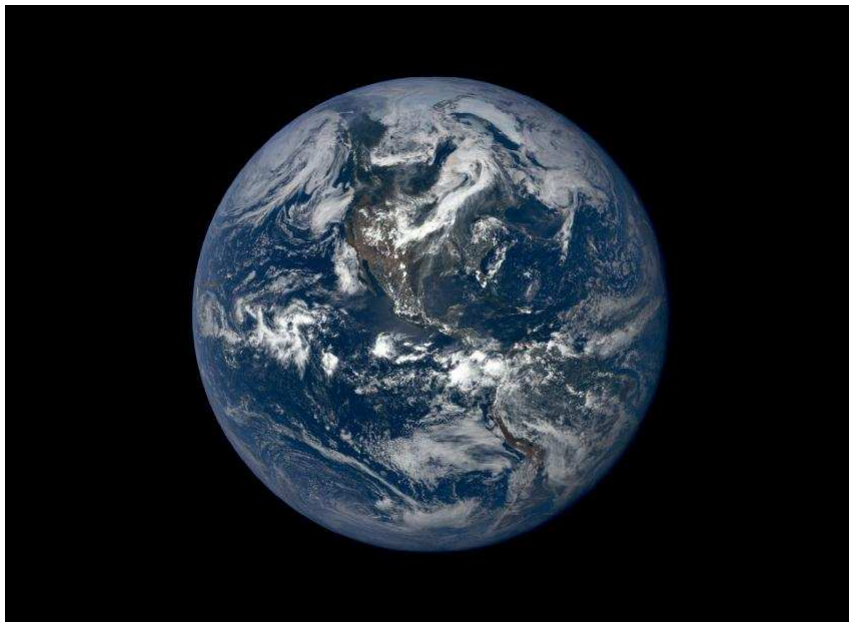
FISICA

Pesare la Terra con i neutrini

I dati del rivelatore IceCube hanno permesso di stimare la massa del pianeta

Una «tomografia» della Terra un po' speciale, realizzata con un ingrediente a sorpresa: i neutrini. L'ha messa a punto un gruppo di ricercatori guidati da Andrea Donini, dell'Università di Valencia, che ha pubblicato i risultati su «Nature Physics». La ricerca ha permesso, tra le altre cose, di ottenere una stima della massa della Terra, fornendo un'interessante alternativa ai metodi geofisici tradizionali.

I neutrini sono particelle elementari di massa piccolissima e privi di carica elettrica, che interagiscono assai poco con la materia ordinaria, tanto da poter attraversare completamente la Terra. Tuttavia, neutrini di alta energia possono essere parzialmente assorbiti dal nostro pianeta. Donini e colleghi , sfruttando i dati registrati tra il 2011 e il 2012 dal rivelatore IceCube – il più grande osservatorio per neutrini attualmente in esercizio, che si trova in Antartide – hanno studiato il comportamento di circa 20.000 neutrini di alta energia prodotti nella collisione tra raggi cosmici (particelle fortemente energetiche provenienti dallo spazio) e atmosfera terrestre.

La quantità di neutrini assorbiti dalla Terra dipende sia dallo spessore del materiale attraversato (che varia in base alla direzione dei neutrini) sia dalla loro energia: ricostruendo la distribuzione del tasso di assorbimento dei neutrini al variare di questi parametri, i ricercatori sono riusciti a determinare il profilo di densità della Terra, ricavando una buona stima della massa.

Una stima che potrà diventare più precisa in futuro usando i dati più recenti registrati da IceCube. Con un vantaggio importante: la «tomografia a neutrini» può fornire informazioni fisiche preziose anche sugli strati più interni della crosta terrestre, difficilmente accessibili con i metodi geofisici tradizionali.

Matteo Serra

Quattro contributi per la massa del protone

Protoni e neutroni, le particelle che costituiscono i nuclei degli atomi, sono i «mattoni» della materia ordinaria di cui noi stessi siamo composti. Le loro proprietà più importanti sono note da tempo, tuttavia ancora oggi i ricercatori continuano a studiarli per definire importanti dettagli. Uno di questi è stato svelato da un gruppo di ricerca guidato da Yi-Bo Yang della statunitense Michigan State University, che ha determinato per la prima volta con precisione i diversi contributi alla massa del protone. Lo studio è stato pubblicato su «Physical Review Letters».

Ogni protone è composto da tre particelle dette quark, tenute insieme dai gluoni, particelle prive di massa e mediatori dell'interazione nucleare forte, una delle quattro forze fondamentali della natura e responsabile della «tenuta» dei nuclei atomici. Il valore della massa del protone non è pari alla semplice somma delle masse dei quark che lo costituiscono, ma è definito da quattro contributi ben distinti.

I ricercatori sono riusciti a ottenere una stima precisa di questi contributi (che fino a oggi erano noti solo a livello qualitativo) grazie a un complesso calcolo numerico basato sulla cromodinamica quantistica (QCD), la teoria che descrive le interazioni forti.

I risultati di Yang e colleghi mostrano che solo uno dei quattro contributi è legato all'effettiva massa dei quark, con una percentuale pari ad appena il nove per cento del totale. Altri due, che corrispondono rispettivamente al 32 e al 36 per cento, sono dovuti al cosiddetto «confinamento», cioè sono una misura dell'energia necessaria a tenere quark e gluoni confinati all'interno del nucleo (l'energia è una grandezza fisica equivalente alla massa, a meno di una costante di proporzionalità, come spiega la celebre relazione della relatività di Albert Einstein $E = mc^2$). L'ultimo contributo, pari al 23 per cento, è invece dovuto a un effetto quantistico detto «anomalo». Gli autori ipotizzano risultati simili anche per il neutrone, la cui massa è quasi identica a quella del protone.

Matteo Serra

Cortesia NASA's Goddard Space Flight Center

BIOLOGIA

La prima volta delle mini-placente

Ottenute artificialmente, rivoluzioneranno gli studi sulle prime fasi della gravidanza

Un gruppo di ricercatori ha ottenuto in laboratorio un modello cellulare che riproduce i primi stadi di sviluppo della placenta umana con un livello di accuratezza mai raggiunto prima. La mini-placenta ha un corredo genetico stabile, forma strutture ramificate simili ai villi coriali (estroflessioni della placenta che mediano il passaggio di nutrienti e sostanze di scarto) e produce gli stessi ormoni che nel primo trimestre di gravidanza regolano il metabolismo della madre.

Per arrivare a questo risultato, gli scienziati coordinati da Ashley Moffett, professoressa di immunologia riproduttiva all'Università di Cambridge, nel Regno Unito, hanno isolato alcune cellule da campioni umani di trofoblasto (lo strato cellulare che dà origine alla metà fetale della placenta) e le hanno immerse in un terreno di coltura contenente un cocktail di proteine e fattori di crescita, che normalmente stimolano il differenziamento dei tessuti embrionali in tessuti placentari. Con tecniche di biologia molecolare i ricercatori hanno quindi monitorato sviluppo e identità molecolare dei nuovi organoidi.

Le mini-placente ottenute artificialmente sono così fedeli all'originale da «ingannare» anche un comune test di gravidanza, si legge su «Nature». La scoperta rivoluzionerà la ricerca biomedica che si concentra sulle prime fasi della gravidanza, offrendo uno strumento eccezionale con cui studiare le alterazioni cellulari e molecolari che talvolta impediscono alla placenta di svolgere i suoi compiti, mettendo a rischio la vita della madre e del bambino. È risaputo che queste alterazioni contribuiscono all'insorgenza di alcune fra le complicanze più gravi, come preeclampsia e aborto spontaneo, che insorgono in gravidanza, ma quali siano i dettagli di questi meccanismi è ancora poco chiaro.

Sara Mohammad

Il DNA dei mitocondri può anche essere paterno

Vacilla un altro dogma della biologia umana: anche nella nostra specie il DNA dei mitocondri può provenire dal padre, non solo dalla madre. Succede in casi rari, ma a questo punto ben documentati sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» da Paldeep Atwal, del Mayo Clinic Hospital di Jacksonville, e Taosheng Huang, del Cincinnati Children's Hospital.

I mitocondri, gli organuli che producono energia nella cellula, hanno un proprio piccolo DNA, e di norma gli animali li trasmettono alla progenie solo attraverso gli ovuli, grazie a un meccanismo che elimina dall'embrione i mitocondri dello spermatozoo. Il nostro DNA mitocondriale quindi deriva solo da nostra madre. O almeno così si è sempre pensato. Sporadiche eccezioni erano già emerse in topi, pecore e drosofila. Ma negli esseri umani, se si eccettua un caso pubblicato nel 2002 sul «New England Journal of Medicine», tutte le segnalazioni erano risultate poco convincenti e imputabili a errori sperimentali. Le indagini con le più recenti tecniche di sequenziamento non hanno rivelato altro che mitocondri materni. Così anche il caso del 2002 era stato rimesso in dubbio.

Atwal e Huang hanno studiato i familiari di tre persone, non imparentate, con tre diversi quadri patologici ascritti ad anomalie mitocondriali e con genomi mitocondriali di insolita eterogeneità. In ciascuna famiglia i sequenziamenti, ripetuti da laboratori indipendenti con tecniche diverse su campioni ogni volta nuovi, hanno mostrato la presenza di DNA mitocondriale anche paterno, in membri di più generazioni successive, per un totale di 17 persone. «Stavolta non può trattarsi di artefatti o contaminazioni. Non diremmo che il dogma dell'eredità materna non vale più, perché abbiamo documentato casi eccezionali», precisano i ricercatori. «Tuttavia la scoperta cambia la visione dell'eredità mitocondriale e, soprattutto quando ne approfondiremo i meccanismi molecolari, potrà aprire nuove vie alla medicina mitocondriale».

Giovanni Sabato

SPL/AGF

CLIMA

L'urbanizzazione porta pioggia

Il suolo cittadino amplifica i fenomeni di precipitazione

Tharindu Nallaperuma/Anadolu Agency/Getty Images

Il rischio idrogeologico dipende dal prodotto di due fattori principali: intensità degli eventi di pioggia e vulnerabilità/esposizione del territorio. Il secondo, in particolare, con l'urbanizzazione del territorio, incide sul deflusso delle acque (le città sono fatte di materiali non assorbenti, come asfalto e cemento) e rende più probabili sia gli allagamenti sia lo scorrimento veloce dell'acqua, che può investire e travolgere mezzi di trasporto, manufatti, persone.

Ma questo secondo fattore agisce esclusivamente a valle del primo o può influenzare anche la quantità di pioggia che cade dall'atmosfera sul terreno, soprattutto nel caso di fenomeni violenti? È la domanda che si sono posti Wei Zhang, dell'Università dell'Iowa, negli Stati Uniti, e colleghi in una ricerca pubblicata su «Nature». Usando il caso di studio dell'uragano Harvey, che ha colpito Houston nel 2017, i ricercatori hanno effettuato esperimenti con il modello WRF ad altissima risoluzione. Dopo essere riusciti a ricostruire in maniera molto soddisfacente le caratteristiche dell'uragano (traiettoria, pioggia, venti) nel caso in cui il suolo della città venisse descritto correttamente, hanno cambiato le caratteristiche del suolo nel modello, rendendolo campagna e campi coltivati.

Come risultato principale hanno ottenuto una diminuzione di pioggia statisticamente significativa. Zhang e collaboratori hanno quindi mostrato che il suolo cittadino incrementa la quantità di pioggia a causa del maggiore attrito e della maggiore temperatura. Tutto questo genera infatti condizioni favorevoli a una più grande instabilità delle masse d'aria e alla convezione violenta in atmosfera. Questo effetto di amplificazione del suolo cittadino sui fenomeni di precipitazione dovrà essere sempre più considerato negli studi di impatto.

Antonello Pasini

La stagionalità di virus e batteri atmosferici

Influenza e raffreddore? C'è un motivo se sono più frequenti durante la stagione fredda. Uno studio coordinato da Emilio Casamayor, ecologo del Centro di studi avanzati di Blanes, in Spagna, e pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences», rivela che durante il corso dell'anno abbondanza e diversità del microbiota (l'insieme dei microrganismi) disperso nell'aria rispettano precisi modelli stagionali. Tramite il sequenziamento di due specifiche sequenze di RNA ribosomiale, il componente essenziale dei ribosomi, le strutture responsabili della sintesi delle proteine, Casamayor e colleghi hanno monitorato per sette anni, con cadenza quindicinale, il microbioma presente nelle precipitazioni di una località dei Pirenei. La composizione chimica dell'acqua piovana è stata analizzata e sottoposta a modellizzazione per risalire all'origine dei microrganismi. La maggiore biodiversità è stata registrata in inverno, dominato da batteri di ambienti forestali e marini. L'estate è caratterizzata da microrganismi legati ad acque dolci, terreni coltivati e zone urbane. Sebbene la provenienza degli aerosol sia l'elemento chiave della stagionalità, gli autori riferiscono la presenza di microrganismi capaci di colonizzare e influenzare la composizione dell'aria di ambienti anche molto distanti tra loro.

Davide Michielin

PALEOANTROPOLOGIA

Arte sempre più preistorica

Scoperta in Borneo la più antica pittura figurativa nota

Da un capo all'altro dell'Eurasia l'arte rupestre fa nuova luce sull'umanità preistorica. Il più antico dipinto figurativo noto è stato individuato in Borneo, nella grotta di Lubang Jeriji Saléh, da Maxime Aubert, della Griffith University, in Australia. Aubert ha esaminato un dipinto rosso-arancione di un animale indefinito, appartenente alla fase più antica della ricca tradizione rupestre locale. Analizzando le incrostazioni calcaree sul dipinto, Aubert lo ha datato ad almeno 40.000 anni fa, il che lo rende la più antica pittura figurativa nota al mondo.

Le datazioni di impronte di mani nella grotta indicano che l'arte rupestre è sorta sull'isola fra i 52.000 e i 40.000 anni fa, circa come in Europa. «Espressioni artistiche simili sono nate quasi in contemporanea ai due estremi dell'Eurasia: non sappiamo se sia una coincidenza o il frutto di una convergenza culturale, di migrazioni su larga scala o di chissà quale causa», conclude Aubert su «Nature». Venendo all'Europa, uno studio su «Athens Journal of History» di Martin Sweatman, dell'Università di Edimburgo, mostra che vari dipinti in Turchia, Francia, Spagna e Germania non sono semplici raffigurazioni di animali, come si pensava: rappresentano le costellazioni di uno zodiaco simile a quello odierno (anche se alcune sono oggi viste come figure diverse), ed erano usate per datare gli eventi raffigurati in relazione a equinozi e solstizi dell'epoca.

A Lascaux, in Francia, un'anatra rappresentava per esempio la Bilancia, dove il Sole appariva all'equinozio di primavera 17.000 anni fa, e la scena raffigurerebbe l'impatto con una meteora avvenuto all'epoca. Interpretazioni analoghe valgono per gli altri siti, indicando che «forse già 40.000 anni fa gli antichi conoscevano bene il cielo notturno, e non erano intellettivamente diversi da noi», dice Sweatman.

Giovanni Sabato

Neanderthal e *H. sapiens*, le relazioni che non ti aspetti

Secondo uno studio di Fernando Villanea e Joshua Schraiber, della Temple University di Philadelphia, pubblicato su «Nature Ecology & Evolution», *Homo sapiens* e *Homo neanderthalensis* si incrociarono più volte e fino a tempi più recenti rispetto a quelli ipotizzati finora.
I frammenti di DNA di Neanderthal presenti nel genoma delle attuali popolazioni umane non africane, studiati con particolari metodi computazionali di apprendimento automatico (*deep learning*), dimostrano che, quando 75.000 anni fa *H. sapiens* cominciò la sua migrazione dall'Africa verso Europa e Asia e si ibridò con gli ominidi che abitavano già queste aree, come appunto i Neanderthal, gli incroci tra le specie si prolungarono per almeno 30.000 anni, con interazioni frequenti e complesse e non certamente riconducibili a un'unica fase di ibridazione.
Secondo gli autori dello studio, infatti, solo questa ipotesi riesce a far luce sulla variabilità di alcune caratteristiche genetiche che si osservano nelle diverse popolazioni umane attuali.
Per esempio, secondo Villanea e Schraiber il 2 per cento del genoma che abbiamo ereditato dai Neanderthal ha influito sul nostro sistema immunitario al punto da spiegare la sua risposta del sistema ad alcune infezioni.

Marina Semiglia

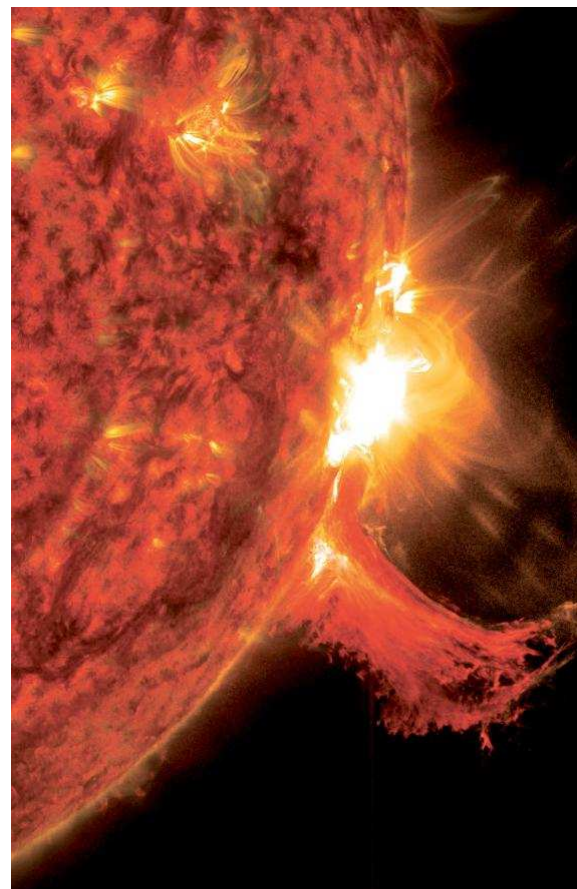
Cortesia Kinez Riza

La rivoluzione attesa delle unità di misura

La scienza richiede unità di misura non più basate su campioni materiali, come stecche o pesi, ma su costanti fisiche fondamentali, in modo che le misurazioni siano stabili, della massima precisione e verificabili ovunque.
Questo risultato finora era stato ottenuto soltanto per le seguenti unità di misura del Sistema internazionale: secondo, metro e candela; ma non per ampere, kelvin, mole e chilogrammo, quest'ultimo ancora rappresentato da un campione di platino-iridio conservato a Parigi, che, nonostante le precauzioni, si era dimostrato anche piuttosto variabile.
Lo scorso novembre, alla conferenza generale di Versailles, in Francia, l'Ufficio internazionale dei pesi e delle misure ha deciso di definire tutte le unità di misura in base a costanti fondamentali. L'ampere sarà definito in base alla carica elementare del protone, il kelvin dalla costante di Boltzmann, la mole dal numero di Avogadro e il chilogrammo dalla costante di Planck.
Così, per misurare una massa, non la si dovrà più confrontare, più o meno direttamente, con il chilogrammo di Parigi, ma la si potrà «pesare», in laboratori specializzati, con una cosiddetta bilancia di Kibble, che valuta quanta forza elettromagnetica, dipendente dalla costante di Planck, serva a controbilanciarla. (*AlSa*)

Trovata una stella gemella del Sole

Nella Via Lattea, la nostra galassia, di stelle simili al Sole ce ne sono davvero tante, ma in quanto a somiglianza questa le batte tutte: si tratta di Hd 186302 ed è a tutti gli effetti una gemella della nostra stella, anche se distante 184 anni luce. A individuarla è stato un gruppo guidato da Vardan Adibekyan, dell'Università di Porto, in Portogallo. Come descritto su «Astronomy & Astrophysics», Adibekyan e colleghi hanno analizzato i dati raccolti dalla missione Gaia dell'Agenzia spaziale europea (ESA) per studiare un certo numero di stelle vicine e, fra queste, selezionare quella con le caratteristiche più vicine a quelle del Sole.

Tramite un processo di selezione a cascata, gli astronomi sono partiti da 17.000 stelle per arrivare a quattro candidate con una composizione chimica identica a quella solare e, infine, ad Hd 186302, che ha raggio, temperatura superficiale e luminosità intrinseca molto vicini ai valori del Sole. Dall'età, pari a 4,5 miliardi di anni, e dal moto nello spazio gli astronomi ipotizzano anche che questa sia non solo coetanea del Sole, ma addirittura nata dalla stessa nebulosa. Adesso non resta che andare a cercare eventuali esopianeti attorno al gemello solare, la cui zona di abitabilità è identica a quella del Sole. (*EmRi*)

Un futuro energetico a idrocarburi

Altro che rispetto dei limiti della CO_2… Per l'International Energy Agency (IEA) dal 2020 il problema sarà la mancanza di idrocarburi. Secondo il *World Energy Outlook 2018* dell'IEA, non c'è possibilità che si rispettino i limiti di emissione di anidride carbonica del trattato di Parigi, perché petrolio, gas e carbone continueranno a dominare. Il rapporto riconosce che è in atto una transizione energetica, trainata dal crollo dei prezzi dell'energia solare e di quella eolica, ma avverte che la crescita demografica farà aumentare del 25 per cento la domanda di energia entro il 2040, e che per il 60 per cento questa domanda sarà ancora soddisfatto dai combustibili fossili.
Secondo tutti gli scenari del rapporto, quindi, rispettare i limiti di Parigi sarà impossibile, come dimostra il fatto che, invece di stabilizzarsi, nel 2017 le emissioni di CO_2 sono cresciute dell'1,7 per cento, e nel 2018 saliranno di un altro 2,7 per cento circa. Anzi, considerati i bassi investimenti in ricerca di nuovi giacimenti degli ultimi anni, dal 2020 potrebbe esserci una carenza di idrocarburi sul mercato con relativo aumento dei prezzi. Auke Hoekstra, esperto di fonti energetiche dell'Università di Eindhoven, nei Paesi Bassi, fa però notare che dal 2006 in poi i rapporti dell'IEA hanno sottostimato l'aumento delle rinnovabili. (*AlSa*)

Gary Kavanagh/iStock (*estrazione di petrolio*); cortesia NASA/SDO (*brillamento solare*)

Il costo ambientale delle criptovalute

Coniare criptovalute ha costi energetici uguali o superiori al fabbricare monete di metallo di pari valore. Per produrre le criptovalute, per esempio Bitcoin, i computer devono eseguire una serie di calcoli intensivi, spiega su «Nature Sustainability» Max Krause, dell'Oak Ridge Institute for Science and Education di Cincinnati negli Stati Uniti. Il processo assorbe molta energia. Krause, un ingegnere che lavora su modelli di emissioni di gas serra, si è chiesto quanta, e con quante emissioni.

Visto il valore volatile delle monete virtuali, ha calcolato i consumi medi per creare l'equivalente di un dollaro nel corso di due anni e mezzo fra il 2016 e i 2018. Ha constatato che per un dollaro in monete virtuali occorrono dai 7 megajoule delle meno energivore ai 17 del Bitcoin, mentre per quelle reali bastano da 4 a 9 megajoule, a seconda del metallo (eccetto per l'alluminio che ne richiede 122). Nel 2017 si stima, pur con un'ampia incertezza, che la produzione di criptovalute abbia consumato tanta energia quanto la Slovenia. Le emissioni dipendono molto dal paese in cui lavorano i computer, ed elementi d'incertezza come questo rendono difficile calcolare l'impatto ambientale preciso e prevedere come cambieranno consumi ed emissioni in futuro. (*GiSa*)

Produrre nanomateriali grazie ai robot

Una delle frontiere dell'elettronica è la realizzazione di cristalli costituiti da strati sovrapposti di strutture dello spessore di un solo atomo; questi cristalli hanno caratteristiche conduttive uniche, utili per realizzare dispositivi come sorgenti di luce, rilevatori ottici, sensori, diodi e transistor grandi appena alcuni miliardesimi di metro.

La loro produzione incontra però notevoli difficoltà, perché opera a una scala in cui dominano le forze di van der Waals, che richiedono tecniche e procedure complesse e tempi assai lunghi di esecuzione. Ora però le cose potrebbero cambiare grazie all'invenzione di un gruppo di scienziati dell'Istituto di scienze industriali dell'Università di Tokyo, che hanno realizzato, come spiega il coordinatore dello studio Tomoki Machida, «un robot in grado di trovare, raccogliere e assemblare in modo automatico fino a 400 cristalli l'ora di nanomateriali come il grafene e molti altri. Una velocità di gran lunga superiore a quella raggiunta dai processi manuali». Il robot potrebbe aprire la strada verso una produzione in serie ed economica di nanodispositivi per i prodotti elettronici del futuro. La realizzazione degli scienziati giapponesi è stata descritta sulla rivista scientifica «Nature Communications». (*RiOl*)

L'ingegnoso sistema dei termitai per riciclare metano

Se mangi tante fibre vegetali, produci molto metano. Immaginarsi poi se ti nutri di legno, come le termiti, responsabili dall'1 al 3 per cento del metano che ogni anno è immesso in atmosfera. Una ricerca pubblicata sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» ha dimostrato però che il gas prodotto da questi insetti è il doppio di quello che in effetti poi finisce in atmosfera. Come mai?
Philipp Nauer dell'Università di Melbourne, ha misurato il gas liberato da termitai, di cui ha anche stimato volume e forma: così, ha potuto ricostruire nel dettaglio il ciclo del metano delle colonie. Durante la digestione di fibre vegetali gli insetti emettono metano. Questo gas però è una fonte di energia per batteri che vivono proprio nelle pareti dei termitai e che quindi catturano metano, funzionando in pratica da filtro. In questo modo, in media è catturata la metà delle emissioni degli insetti, con punte addirittura dell'80 per cento.
Il metano è un gas serra più potente della CO_2, e le osservazioni di Nauer potrebbero contribuire a sviluppare sistemi per ridurne le emissioni dovute all'attività umana. (*FeSg*)

ApisitWilaijit/iStock

La nostra galassia non è in equilibrio

La letteratura scientifica sulla cinematica della nostra galassia descrive il nostro sistema stellare come un'enorme girandola in rotazione attorno a un asse perpendicolare al piano del disco galattico. Ma l'idea che il sistema sia simmetrico rispetto all'asse di rotazione e in condizioni di equilibrio dinamico è probabilmente da rivedere. Ad affermarlo sono, in uno studio pubblicato su «Astronomy & Astrophysics», Martín López Corredoira, dell'Istituto di astrofisica delle Canarie, e Francesco Sylos Labini, dell'Istituto dei sistemi complessi del Consiglio nazionale delle ricerche (CNR-ISC), che hanno scoperto movimenti stellari significativamente distanti dal semplice moto rotazionale. Grazie ai dati raccolti dalla missione Gaia dell'Agenzia spaziale europea, i due ricercatori hanno infatti determinato il moto di un elevato numero di stelle della Via Lattea e scoperto che molte hanno anche componenti di velocità radiali, ovvero lungo la congiungente stella-centro della nostra galassia, e verticali, ovvero perpendicolari al piano del disco galattico.
Questa scoperta costringe gli astronomi a rivedere i modelli dinamici della Via Lattea, sul cui equilibrio si basa anche la stima della materia oscura, la misteriosa materia che compone il 27 per cento dell'universo e non interagisce con la radiazione elettromagnetica, contenuta al suo interno. (*EmRi*)

RAPPORTO SPECIALE

Dieci tecnologie emergenti per il 2019

Capire le innovazioni più recenti e le sfide che le accompagnano aiuterà la società a decidere come ottenerne il massimo dei benefici

IN BREVE

L'intelligenza artificiale è usata per cercare farmaci e materiali nuovi, e migliorare gli assistenti digitali. Presto avremo immagini virtuali sovrapposte al mondo reale. I computer quantistici stanno colmando il divario con quelli classici.

Nel campo della salute, strumenti diagnostici avanzati danno maggiore profondità alla medicina di precisione. Cellule produttrici di farmaci, impiantabili e capaci di sfuggire al sistema immunitario, e terapie di stimolazione nervosa potrebbero migliorare gestione e trattamento delle malattie.

Alcuni ricercatori fanno crescere carne da staminali, e la comunità che lavora sui *gene drive* sviluppa regole con cui governare l'uso di strumenti capaci di alterare le specie. Nanomateriali a controllo luminoso potrebbero aumentare l'efficienza delle celle solari.

Illustrazioni di Vanessa Branchi

In che modo la tecnologia ci cambierà la vita nel prossimo futuro?

L'intelligenza artificiale accelererà di molto la progettazione di farmaci e materiali innovativi. Strumenti diagnostici avanzati renderanno possibile una medicina sempre più personalizzata. La realtà aumentata sarà dovunque, sovrapponendo informazioni e animazioni su immagini del mondo reale per aiutarci nelle attività quotidiane e aiutando l'industria a funzionare in modo più efficiente. Se ci ammaleremo, i medici potranno curarci impiantando nel corpo cellule che funzionano da fabbriche di farmaci. Mangeremo carne, pollo e pesce cresciuti da cellule staminali, riducendo parecchio l'impatto ambientale dell'allevamento animale e risparmiando trattamenti inumani a innumerevoli esseri viventi.

Queste idee capaci di cambiare il mondo, con le altre della lista delle dieci tecnologie emergenti, sono state selezionate da esperti di primo piano in campi come biologia, chimica inorganica, robotica e intelligenza artificiale. La lista è il risultato di un processo di selezione intensivo.

Innanzitutto siamo partiti da una ricerca a vasto raggio, sollecitando gli innovatori delle comunità dei Global Future Councils e dell'Expert Network del World Economic Forum, il comitato scientifico e la redazione di «Scientific American» e altri soggetti a fornire suggerimenti. Poi, in riunioni virtuali, un comitato direttivo ha valutato la rispondenza delle proposte a una serie di criteri. Le tecnologie da segnalare dovevano essere in grado di dare significativi benefici a società ed economie, e di farlo nei prossimi 3-5 anni. Dovevano essere potenzialmente dirompenti, in grado di cambiare settori economici o modi consolidati di agire. E dovevano essere in uno stadio di sviluppo ancora relativamente iniziale, non ancora di uso diffuso ma studiate da molti gruppi, capaci di suscitare entusiasmi tra gli esperti e attrarre investimenti crescenti e, idealmente, sviluppate da più aziende, non una sola. Da una lista di oltre 50 candidature, il comitato direttivo ne ha scelte una ventina, su cui assumere ulteriori informazioni. La decisione finale è stata presa in altre due sedute di discussione, dopo aver approfondito le informazioni raccolte.

Mariette DiChristina e Bernard S. Meyerson

Realtà aumentata ovunque

Il mondo sarà ricoperto di dati

di Corinna E. Lathan e Andrew Maynard

La realtà virtuale (VR) ci immerge in un universo di finzione, isolato. La realtà aumentata (AR), invece, sovrappone informazioni generate da un computer sul mondo reale, in tempo reale. Quando si guarda o si indossa un dispositivo dotato di telecamera e *software* per AR – che sia uno *smartphone*, un *tablet*, un casco o degli occhiali «intelligenti» – il programma analizza il flusso di dati video in entrata, scarica ampie informazioni relative alla scena e sovrappone a essa dati, immagini o animazioni rilevanti, spesso in 3D.

Due esempi: lo schermo per il parcheggio assistito dell'automobile e il gioco popolare Pokemon GO. Un gran numero di applicazioni per l'utente – che possono tradurre insegne e segnali stradali per i turisti stranieri, permettere a uno studente di dissezionare una rana virtuale o farci vedere che effetto farà una poltrona in salotto prima di portarla a casa – sono anch'esse dotate di AR. In futuro questa tecnologia permetterà di visitare un museo evocando come guida una sorta di ologramma; i chirurghi potranno visualizzare i tessuti sotto la pelle dei pazienti in 3D; architetti e *designer* avranno strumenti inediti per elaborare progetti in collaborazione; gli operatori dei droni controlleranno i loro robot distanti attraverso immagini aumentate; e i principianti potranno imparare a svolgere nuovi compiti più rapidamente in campi che vanno dalla medicina alla manutenzione dei macchinari.

Nei prossimi anni l'offerta diretta ai consumatori dovrebbe espandersi grazie a programmi facili da usare nella progettazione di applicazioni, ma al momento l'impatto più forte dell'AR riguarda l'industria, dove è parte integrante della cosiddetta «quarta rivoluzione industriale», o «industria 4.0»: una trasformazione sistemica dell'attività manifatturiera attraverso l'integrazione di sistemi fisici e digitali per migliorare la qualità, abbassare i costi e aumentare l'efficienza. Molte aziende, per esempio, ne stanno testando l'uso sulle catene di montaggio. L'AR può far arrivare l'informazione giusta proprio nel momento in cui ce n'è bisogno (come quando un operaio deve scegliere un certo pezzo rispetto a un altro), e dunque ridurre gli errori, accrescere l'efficienza e migliorare la produttività. Può anche visualizzare tensioni e stress in macchinari e strutture e dare immagini in tempo reale delle zone in cui ci sono problemi.

Analisti di mercato come ABI Research, IDC e Digi-Capital ritengono che la realtà aumentata sia sul punto di diffondersi. E si attendono che il relativo mercato, il cui valore è oggi stimato in circa 1,5 miliardi di dollari, crescerà fino a 100 miliardi entro il 2020. Grandi aziende tecnologiche – comprese Apple, Google e Microsoft – stanno dedicando ingenti risorse finanziarie e

umane a prodotti e applicazioni sia di realtà virtuale sia di realtà aumentata. E il capitale di rischio (*venture capital*) sta entrando in gioco, con 3 miliardi di dollari investiti in AR e VR nel 2017, di cui la metà solo nel quarto trimestre. Di recente la «Harvard Business Review» ha indicato nell'AR una tecnologia trasformativa che interesserà tutti i settori.

Permangono alcuni ostacoli. Al momento, limiti di *hardware* e di larghezza di banda per le comunicazioni pongono barriere al passaggio all'uso quotidiano da parte dei consumatori. Per esempio, molte *app* usate oggi per migliorare l'esperienza di viaggiatori e visitatori di musei devono essere scaricate in anticipo, e anche così la qualità della grafica può essere inferiore alle aspettative dell'utente. Ma il campo è pronto a crescere in misura spettacolare; via via che saranno disponibili *chip* per dispositivi mobili più veloci e predisposti per l'AR, arriveranno sul mercato occhiali intelligenti più versatili e aumenterà la larghezza di banda. Allora la realtà aumentata prenderà posto accanto a Internet e ai video in diretta come un aspetto ordinario della vita quotidiana.

Hanno contribuito

Comitato direttivo sulle tecnologie emergenti

Mariette DiChristina,
presidente del comitato direttivo, è *editor in chief* di «Scientific American», ed *executive vicepresident*, Editorial and Publishing, Magazines del Nature Research Group, per la società madre, Springer Nature. Dal 2014 al 2016 è stata vicepresidente del Meta-Council on Emerging Technologies, uno dei Global Agenda Councils del World Economic Forum.

Bernard S. Meyerson,
vicepresidente del comitato di direzione. è il responsabile per l'innovazione di IBM. È membro della National Academy of Engineering degli Stati Uniti e ha ricevuto numerosi premi come fisico, ingegnere e manager aziendale. Nel 2014-2016 ha presieduto il Meta-Council on Emerging Technologies e nel 2016-2018 il Global Future Council on Advanced Materials del World Economic Forum.

Habiba Alsafar
è *associated professor* di ingegneria biomedica alla Khalifa University degli Emirati Arabi Uniti (EAU), dove dirige inoltre il centro di eccellenza in biotecnologie. Il suo lavoro riguarda l'identificazione dei segmenti del genoma che predispongono a malattie di cui sta crescendo la prevalenza nelle comunità degli EAU. Nel 2016-2018 ha fatto parte del Global Council on Biotechnology del World Economic Forum.

Alán Aspuru-Guzik
è professore di chimica e informatica all'Università di Toronto e fa parte del Vector Institute for Artificial Intelligence. Cofondatore di Zapata Computing e Kebotix, è *Canada 150 Research Chair 150* in chimica teorica e quantistica. Nel 2016-2018 ha fatto parte del Global Future Council on Advanced Materials del World Economic Forum.

Jeff Carbeck,
ha costituito e fatto crescere diverse aziende, è CEO di 10EQS, azienda che mobilita le conoscenze di numerosi esperti, tramite *crowdsourcing*, per risolvere problemi di business. Nel 2016-2018, ha fatto parte del Global Future Council on Advanced Materials del World Economic Forum.

Rona Chandrawati
è stata inserita nella Young Scientist Community of 50 Under Age 40 del World Economic Forum nel 2018 e fa parte dell'Expert network del Forum. È *senior lecturer* e responsabile del Nanotechnology for Food and Medicine Laboratory dell'Università del New South Wales (UNSW Sidney) in Australia. Le sue ricerche riguardano lo sviluppo di materiali bio-ispirati per la somministrazione di farmaci e per sensori.

Cyntha H. Collins
è *associate professor* di ingegneria chimica e biologica al Rensselaer Polytechnic Institute dove applica approcci interdisciplinari – dalla biologia sintetica e genomica microbica ai big data – per comprendere i diversi microbiomi e introdurre proprietà utili nei microbi con l'ingegneria genetica. È stata Young Scientist del World Economic Forum del 2016 e ha fatto parte nel 2016-2018 del Global Future Council on Biotechnologies del World Economic Forum.

Seth Fletcher
è *chief features editor* di «Scientific American».

Javier Garcia Martinez
è professore di chimica inorganica e direttore del laboratorio di nanotecnologie molecolari dell'Università di Alicante, in Spagna. È fra i fondatori di Rive Technology (spin-off del Massachusetts Institute of Technology, che commercializza catalizzatori nanostrutturati per l'industria chimica), fa parte del comitato esecutivo dell'Unione internazionale di chimica pura e applicata (IUPAC), è fra gli Young Global Leader e nell'Expert Network del World Economic Forum. Ha pubblicato molti lavori su nanomateriali, reazioni catalitiche ed energia.

Hiroaki Kitano,
esperto di intelligenza artificiale e biologia dei sistemi, è presidente e CEO di Sony Computer Science Laboratories e dirige il System Biology Institute, entrambi a Tokyo. Ha fatto parte di vari Global Future Council del World Economic Forum; ultimamente (2016-2018) fa parte dell'Artificial Intelligence and Robotics Council.

Corinna E. Lathan
è cofondatrice e CEO di AnthroTronix, azienda di ricerca e sviluppo in ingegneria biomedica che realizza prodotti come dispositivi digitali per la salute, tecnologia «da indossare», robotica e realtà aumentata. Fa parte del consiglio di amministrazione di PTC, provider di «Internet delle cose» e piattaforme di realtà aumentata. È stata inoltre nominata Young Global Leader and Technology Pioneer dal World Economic Forum e ha presieduto il Global Future Council on Human Enhancement del Forum nel 2016-2018.

Geoffrey Ling,
ex-colonnello dell'Esercito degli Stati Uniti, insegna neurologia alla Uniformed Services University of Health Sciences e alla John Hopkins University. Esperto di sviluppo e transizione all'uso commerciale delle tecnologie, ha ricoperto posizioni direttive alla Defense Advanced Research Projects Agency e, sotto la presidenza di Barack Obama, nell'Office of Science, Technology and Policy della Casa Bianca. Nel 2016-18, ha fatto parte del Council on Neurotechnologies del World Economic Forum.

Andrew Maynard
è professore alla School for the Future of Innovation in Society dell'Arizona State University. È appena stato pubblicato il suo libro *Films from the future: The technology and Morality of Sci-Fi Movies*. Il suo lavoro è centrato sullo sviluppo e sull'uso responsabile delle tecnologie emergenti. Nel 2016-18, ha fatto parte del Global Future Council on Technology, Values and Policy del World Economic Forum.

Elizabeth O'Day
è CEO e fondatrice di Olaris Therapeutics, azienda dedicata alla medicina di precisione di Cambridge, in Massachusetts, e nel 2016-2018 ha fatto parte del Global Future Council on Biotechnologies del World Economic Forum. Inoltre è la fondatrice di Lizzard Fashion, Proyecto Chispa, Women in Science and Technology, PhiSB.

Sang Yup Lee,
co-presidente 2016-18 del Global Future Council on Biotechnologies del World Economic Forum, è *Distinguished Professor* di ingegneria biochimica e biomolecolare al Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), e preside dei KAIST Institutes. È proprietario di oltre 630 brevetti.

AUTORE OSPITE

Owen Schaefer
è *research assistant professor* del Center for Biomedical Ethics della Yoong Loo Lin School of Medicine della Singapore National University. Studia gli aspetti etici delle biotecnologie innovative in fase di sviluppo e ha scritto sulle tematiche etiche del miglioramento degli esseri umani per via tecnologica, della genetica, dei big data, della riproduzione assistita e della produzione di carne in vitro. Nel 2016-18 è stato fra i *fellow* del Global Future Council on Technology Values and Politics del World Economic Forum.

MEDICINA

di Geoffrey Ling e Corinna E. Lathan

Dispositivi «elettroceutici»

Terapie di stimolazione dei nervi potrebbero sostituire i farmaci in molte condizioni croniche

I dispositivi detti «elettroceutici» – con cui si trattano vari malanni con impulsi elettrici – sono usati da tempo in medicina: si pensi ai *pacemaker* cardiaci, agli impianti cocleari per la sordità e alla stimolazione cerebrale profonda per la malattia di Parkinson. Uno di questi approcci è pronto a diventare più versatile, migliorando in modo netto i trattamenti per una serie di condizioni. Si tratta di inviare segnali al nervo vago, che trasmette impulsi dal tronco cerebrale alla maggior parte degli organi e da essi ne riceve.

Nuove applicazioni della stimolazione del nervo vago (VNS) sono state in parte rese possibili da ricerche effettuate, fra gli altri, da Kevin Tracey del Feinstein Institute for Medical Research, che mostrano come il nervo vago emetta composti chimici che aiutano a regolare il sistema immunitario. Il rilascio di uno specifico neurotrasmettitore nella milza, per esempio, calma cellule immunitarie coinvolte nei processi infiammatori in tutto il corpo. Queste scoperte indicano che la VNS potrebbe avere effetti benefici per altre condizioni oltre a quelle segnate da disturbi dei segnali elettrici, come autoimmunità e infiammazioni. Per i pazienti potrebbe essere una manna, perché spesso i farmaci falliscono o hanno seri effetti collaterali. La VNS potrebbe essere più tollerabile perché agisce su un nervo specifico, mentre in genere i farmaci viaggiano in tutto il corpo, colpendo potenzialmente altri tessuti oltre a quelli bersagliati nel trattamento.

Di recente negli Stati Uniti sono stati approvati stimolatori portatili non invasivi del nervo vago progettati per attenuare emicranie e mal di testa a grappolo. Ma non è ancora chiaro come agisca la stimolazione del nervo vago

Fin qui gli studi sulle applicazioni legate a fenomeni infiammatori sono incoraggianti. Dispositivi per VNS sviluppati da SetPoint (un'azienda fondata, con altri, dallo stesso Tracey) si sono dimostrati sicuri in sperimentazioni preliminari su esseri umani per l'artrite reumatoide, che provoca infiammazioni dolorose e deformanti delle articolazioni, e per la malattia di Crohn, che comporta infiammazione intestinale. Per entrambe le condizioni sono attualmente in corso nuove sperimentazioni.

Si stanno esaminando approcci elettroceutici anche ad altre malattie che hanno una componente infiammatoria, come quelle cardiovascolari, disturbi del metabolismo e demenze nonché per disturbi autoimmunitari come il lupus, in cui il nervo vago stesso riduce la propria attività. Un'altra potenziale applicazione di questa tecnologia riguarda la prevenzione del rigetto dei tessuti trapiantati.

La maggior parte degli stimolatori del nervo vago, compresi i dispositivi di SetPoint e quelli già in uso per il trattamento di epilessia e depressione, sono impiantabili. In genere i medici li dispongono sotto la pelle, al di sotto della clavicola. I fili provenienti dal dispositivo si avvolgono attorno a una branca del nervo vago e inviano impulsi elettrici a intervalli predeterminati; frequenza e altre caratteristiche sono programmate mediante un dispositivo magnetico esterno. I dispositivi attuali hanno un diametro di 3,5 centimetri circa, ma ci si aspetta che nel tempo diventino più piccoli e più finemente programmabili.

Di recente hanno ottenuto l'approvazione della Food and Drug Administration (FDA) anche stimolatori portatili non invasivi del nervo vago per attenuare emicranie e cefalea a grappolo, anche se non è ben chiaro come la stimolazione del nervo vago sia di aiuto in queste condizioni cliniche. Sono dispositivi da tenere in mano, che inviano lievi stimoli elettrici al nervo attraverso la pelle del collo o l'orecchio.

Il nervo vago non è l'unico a essere bersagliato dai nuovi approcci elettroceutici. Alla fine del 2017 la FDA ha approvato un dispositivo non impiantabile che allevia l'astinenza da oppiacei inviando segnali a branche dei nervi craniali e occipitali attraverso la pelle dietro le orecchie. Il dispositivo ha ottenuto l'assenso della FDA dopo che in 73 pazienti in astinenza da oppiacei è stata osservata una riduzione della severità dei sintomi del 31 per cento o più.

Il costo dei dispositivi impiantabili e degli interventi chirurgici potrebbe ostacolare un'ampia adozione delle terapie VNS, anche se il problema dovrebbe ridursi via via che la tecnologia diventa meno invasiva. Tuttavia il costo non è l'unica difficoltà. È ancora necessario che i ricercatori capiscano meglio come la VNS produce i suoi effetti in ognuna delle condizioni da curare, e come ottimizzare l'andamento delle stimolazioni per ogni paziente. È anche possibile che gli impulsi indirizzati al nervo vago influiscano sui nervi circostanti in modi indesiderati.

Eppure, con il crescere degli studi e delle sperimentazioni su meccanismi ed effetti, la VNS e altre terapie elettroceutiche potrebbero alla fine riuscire a gestire un'ampia gamma di condizioni croniche, riducendo potenzialmente la necessità di assumere farmaci per milioni di pazienti.

Produrre carne dalle staminali

Mangiare carne risparmiando però animali e ambiente

di G. Owen Schaefer

Sarebbe bello poter addentare un succulento hamburger di manzo prodotto senza uccidere animali. Il sogno sta diventando realtà grazie a carni fatte crescere in laboratorio partendo da cellule in coltura. Diverse *start-up* stanno sviluppando manzo, maiale, pollame, pesce e frutti di mare cresciuti in laboratorio, per esempio Mosa Meat, Memphis Meat, SuperMeat e Finless Foods. E il settore sta attirando finanziamenti milionari. Nel 2017, per esempio, Memphis Meat ha ricevuto 17 milioni di dollari provenienti, fra l'altro, da Bill Gates e da una multinazionale agro-alimentare come Cargill.

Adottata su larga scala, la carne cresciuta in laboratorio, chiamata anche carne pulita, potrebbe eliminare gran parte dei trattamenti crudeli ed eticamente inaccettabili a cui sono sottoposti gli animali allevati per ottenere cibo. E potrebbe anche ridurre il considerevole costo ambientale della produzione di carne: sarebbero necessarie solo risorse per generare e alimentare le cellule in coltura, non un intero organismo dalla nascita in poi.

Il primo passo è il prelievo di un campione di muscolo da un animale. I tecnici raccolgono cellule staminali dal tessuto, le fanno moltiplicare molte volte e le lasciano differenziare in fibre primitive che poi si ingrossano a formare tessuto muscolare. Mosa Meat afferma che un campione prelevato da una vacca può dare tessuti muscolari sufficienti a produrre 80.000 dei classici hamburger da poco più di 100 grammi.

Varie start-up si aspettano di avere prodotti da vendere entro qualche anno. Ma la carne pulita dovrà superare diverse barriere per diventare sostenibile dal punto di vista commerciale.

Due riguardano costo e sapore. Nel 2013, quando è stato presentato alla stampa un hamburger di carne cresciuta in laboratorio, il suo costo di produzione superava i 300.000 dollari e al palato risultava troppo secco (aveva pochissimi grassi). Da allora il costo è precipitato. Memphis Meat ha riferito quest'anno che poco più di 100 grammi della sua carne macinata costano circa 600 dollari. Se la tendenza è questa, la carne pulita potrebbe diventare competitiva con quella tradizionale entro alcuni anni. La questione del sapore si potrebbe affrontare regolandone la consistenza e con l'aggiunta di altri ingredienti.

Per farla accettare sul mercato, si dovrà dimostrare che la carne pulita si può mangiare senza pericolo. Anche se non c'è motivo di pensare che possa costituire un rischio per la salute, solo ora la FDA inizia a occuparsi di come regolamentare la carne prodotta in laboratorio. Intanto i produttori tradizionali stanno reagendo: sostengono che i prodotti ottenuti in laboratorio in realtà non sono affatto carni e non dovrebbero essere etichettate come tali, e le indagini di mercato mostrano che il pubblico ha solo un tipiedo interesse nel mangiare carne ottenuta in laboratorio.

Malgrado queste difficoltà, le aziende interessate vanno avanti. Se saranno in grado di realizzare prodotti di sapore credibile ed economicamente accessibili, la carne pulita potrebbe rendere le nostre abitudini alimentari più accettabili in termini etici e più sostenibili per l'ambiente.

4 INFORMATICA

Programmi che discutono e istruiscono

Nuovi algoritmi permetteranno ai dispositivi personali di apprendere qualunque argomento abbastanza bene da affrontare una discussione

di Bernard S. Meyerson

A volte gli assistenti digitali attuali possono ingannarvi nel farvi credere di essere umani, ma quelli in arrivo saranno di gran lunga più bravi. Dietro le quinte, Siri, Alexa e compagnia usano raffinati programmi di riconoscimento vocale per capire che cosa stiamo chiedendo e come soddisfarci, e generano risposte predefinite ma corrispondenti alle domande con un parlato che suona naturale. I sistemi di questo tipo devono essere preliminarmente «addestrati», cioè esposti a molti esempi del tipo di richieste che gli esseri umani probabilmente potrebbero fare, e le risposte appropriate devono essere scritte da esseri umani e organizzate in formati di dati altamente strutturati.

È un lavoro che richiede tempo e che porta ad assistenti digitali capaci di eseguire solo una ristretta gamma di compiti. Questi sistemi sono in grado di «imparare» – le loro capacità di apprendimento automatico permettono di migliorare la corrispondenza tra domande in entrata e risposte preesistenti – ma in misura limitata. Tuttavia già così sono impressionanti.

A livelli più alti di raffinatezza e complessità, oggi si stanno sviluppando tecnologie che permetteranno alla prossima generazione di questi dispositivi di assorbire e organizzare dati non strutturati (testi grezzi, video, immagini, spezzoni sonori, e-mail e via dicendo) da una miriade di fonti e poi dare autonomamente consigli convincenti – oppure discutere –

5 BIOTECNOLOGIE

di Sang Yup Lee

Cellule per produrre farmaci nel corpo

Rilasciare agenti terapeutici nel corpo, dove e quando servono e senza attacchi da parte del sistema immunitario

su un determinato argomento senza essere stati addestrati in precedenza a trattarlo.
Già si vede un barlume di questa capacità in siti web che propongono programmi chiamati *chatbot* che possono rispondere a domande formulate in linguaggio naturale relative a una gran varietà di insiemi di dati su cui sono stati addestrati. Questi chatbot hanno bisogno di poco o nessun addestramento sulle specifiche domande o richieste; usano dati preconfigurati e una capacità emergente di «leggere» i materiali pertinenti di riferimento che sono forniti loro. Richiedono però un certo addestramento per riconoscere parole e intenzioni prima di poter dare risposte altamente precise.
A giugno 2018 IBM, per cui lavoro, ha dato una dimostrazione di una versione più avanzata di questa tecnologia: un sistema ha portato avanti un dibattito con un esperto umano in tempo reale senza essere stato addestrato in precedenza né sull'argomento né sulla posizione che doveva sostenere. Partendo da dati non strutturati (fra cui contenuti tratti da Wikipedia, in parte corretti per renderli più chiari), il sistema doveva accertare rilevanza e veridicità delle informazioni e organizzarle in un insieme da usare per costruire argomentazioni coerenti a sostegno della posizione che gli era stata assegnata. Inoltre doveva rispondere alle argomentazioni del suo avversario umano. Nel corso della dimostrazione il sistema è stato impegnato in due dibattiti, e in uno di essi è stato giudicato più persuasivo del suo avversario da un ampio gruppo di spettatori.
La relativa tecnologia – di cui fa parte un programma capace non solo di capire il linguaggio naturale ma anche di gestire la sfida più difficile di individuare i sentimenti positivi e negativi – è stata sviluppata nel corso di oltre cinque anni ed è ancora in gran parte un lavoro in corso. Tuttavia, la vittoria di un sistema di intelligenza artificiale a risposte non predefinite contro un esperto umano apre già la strada a innumerevoli applicazioni collegate che potrebbero venire alla luce nel giro di 3-5 anni, se non prima. Per esempio un sistema del genere potrebbe aiutare i medici a trovare rapidamente studi rilevanti per un caso particolarmente controverso e poi a discutere i pregi di un certo protocollo di trattamento.
Questi sistemi intelligenti serviranno solo per mettere insieme le conoscenze esistenti, non per crearne di nuove come può fare uno scienziato di laboratorio o un esperto. Eppure, via via che le macchine diventano sempre più intelligenti, fanno emergere lo spettro della perdita di posti di lavoro. È compito della società dare alla prossima generazione le abilità di cui avrà bisogno per affrontare i problemi che per essere risolti richiedono l'ingegno umano.

Molti diabetici si pungono un dito diverse volte al giorno per misurare i livelli degli zuccheri nel sangue e decidere la dose di insulina da assumere. Impiantando le cellule pancreatiche che normalmente producono l'insulina nel corpo – le cosiddette cellule delle isole pancreatiche – si potrebbe rendere superfluo questo complicato e fastidioso procedimento.
Gli impianti cellulari potrebbero rivoluzionare anche il trattamento di vari altri disturbi, fra cui cancro, insufficienza cardiaca, emofilia, glaucoma e morbo di Parkinson. Questi impianti, però, hanno un grosso difetto: il ricevente deve assumere farmaci immunosoppressivi per un tempo indefinito allo scopo di impedire il rigetto delle cellule da parte del sistema immunitario; e questi farmaci possono avere seri effetti collaterali, come un aumento del rischio di infezioni e di tumori maligni.
In decenni di lavoro gli scienziati hanno inventato diversi modi di racchiudere le cellule in membrane semipermeabili che impediscono al sistema immunitario di attaccare le cellule impiantate; le capsule permettono l'entrata di nutrienti e altre piccole molecole e l'uscita degli ormoni o delle altre proteine terapeutiche prodotte.
Tuttavia non basta tenere le cellule al sicuro: se il sistema immunitario vede come estraneo il materiale protettivo, farà sì che le capsule siano ricoperte di tessuto cicatriziale; e la risultante «fibrosi» impedisce ai nutrienti di raggiungere le cellule, uccidendole.
I ricercatori stanno cominciando a risolvere il problema. Nel 2016, per esempio, un gruppo del Massachusetts Institute of Technology (MIT) ha reso pubblico un sistema per rendere le cellule impiantate invisibili al sistema immunitario. Dopo aver prodotto e testato centinaia di materiali, i ricercatori hanno scelto una versione modificata per via chimica dell'alginato, un gel che ha una lunga storia di uso sicuro nel corpo umano. Le cellule delle isole pancreatiche incapsulate in questo gel e impiantate in topi diabetici hanno subito iniziato a produrre insulina in risposta al variare dei livelli ematici del glucosio, tenendoli sotto controllo per tutti i sei mesi dello studio. Non è stata osservata fibrosi. In un altro studio, lo stesso gruppo ha mostrato che bloccando una particolare proteina (il recettore del fattore stimolante le colonie 1) dei macrofagi, cellule immunitarie importanti nella fibrosi, si può inibire la cicatrizzazione. L'aggiunta di questo fattore bloccante dovrebbe migliorare ulteriormente la sopravvivenza delle cellule impiantate.
Sono nate diverse aziende che sviluppano terapie con cellule incapsulate. Una di esse, Sigilon Therapeutics, sta facendo progredire la tecnologia sviluppata al MIT in modo da progettare trattamenti per diabete, emofilia e un disturbo del metabolismo detto malattia da accumulo lisosomiale. Il suo lavoro sul diabete ha come partner l'azienda farmaceutica Ely Lilly. Altri esempi sono Semma Therapeutics, azienda che lavora sempre sul diabete, con una propria tecnologia; Neurotech Pharmaceuticals, che ha impianti cellulari in fase di sperimentazione clinica per glaucoma e varie affezioni oculari con degenerazione della retina; Living Cell Technologies sta testando a livello clinico impianti cellulari per la malattia di Parkinson, e sviluppa terapie per altre condizioni neurodegenerative.
Attualmente le cellule da incorporare nelle capsule sono prelevate da animali o cadaveri umani o sono derivate da staminali umane. Un giorno però le terapie con cellule impiantate potrebbero usare una più ampia gamma di tipi cellulari, forse anche ingegnerizzati con la biologia sintetica, in cui si riprogramma il patrimonio genetico delle cellule affinché svolgano nuove funzioni, come il rilascio controllato e a richiesta di specifiche molecole farmaceutiche in un tessuto.
Siamo ancora agli inizi. Né la sicurezza né l'efficacia delle terapie con cellule incapsulate sono state ancora provate in ampi trial clinici, ma i segnali sono incoraggianti.

Progettare nuove molecole in modo veloce

Algoritmi di apprendimento automatico accelerano la ricerca di farmaci e materiali nuovi

di Jeff Carbeck

Volete progettare un nuovo materiale per l'energia solare, un farmaco anticancro o un composto che impedisca a un virus di attaccare una coltura? Dovete affrontare due sfide: trovare la struttura chimica giusta e le reazioni per combinare gli atomi giusti a dare la molecola, o l'insieme di molecole, desiderati. In passato le risposte sono arrivate da ipotesi sofisticate con l'aiuto della serendipidità. È un processo che richiede tempo e include un gran numero di tentativi falliti. Un piano di sintesi, per esempio, può prevedere centinaia di singoli passi, ciascuno dei quali avrà reazioni collaterali o prodotti secondari, o magari potrebbe non funzionare affatto. Ora, però, l'intelligenza artificiale (IA) inizia ad aumentare l'efficienza delle fasi di progettazione e di sintesi, rendendo l'impresa più rapida, facile ed economica, riducendo i rifiuti chimici.

Nell'IA, algoritmi di apprendimento automatico analizzano tutti gli esperimenti che hanno cercato di scoprire o sintetizzare la sostanza di interesse; sia quelli che hanno funzionato sia, passaggio cruciale, quelli falliti. Sulla base delle regolarità individuate, gli algoritmi prevedono strutture di nuove molecole potenzialmente utili e possibili modi di fabbricarle. Non c'è uno strumento di apprendimento automatico in grado di fare tutto questo da solo, ma le tecnologie basate sull'IA stanno entrando nella progettazione di molecole per farmaci e materiali avanzati. Per esempio uno di questi strumenti, sviluppato da ricercatori dell'Università di Münster, in Germania, simula ripetutamente le 12,4 milioni di reazioni chimiche a singolo passaggio oggi note per arrivare a una via sintetica in più passaggi, pianificando il tutto 30 volte più rapidamente degli esseri umani.

In campo farmaceutico, una tecnologia basata sull'IA, detta apprendimento automatico generativo, sta entusiasmando. La maggior parte delle case farmaceutiche immagazzina milioni di composti e ne valuta le potenzialità terapeutiche. Ma anche con gli strumenti della robotica e l'automazione dei laboratori il processo è lento e dà relativamente pochi risultati positivi. Inoltre, tutte queste «librerie» messe insieme coprono solo una minuscola frazione delle oltre 10^{30} molecole teoricamente possibili. Con un insieme di dati che descrive la struttura dei

Diagnostica per la medicina di precisione

Una nuova generazione di strumenti può aiutare a superare le terapie uguali per tutti

di Elizabeth O'Day e Habiba Alsafar

Per la maggior parte del XX secolo le donne con tumore al seno sono state trattate in modo simile. Da allora la terapia è diventata più individuale: oggi i tumori al seno sono divisi in sottotipi e sono trattati su questa base. Molte donne i cui tumori producono recettori per gli estrogeni, per esempio, potrebbero ricevere farmaci che hanno per bersaglio questi recettori e la chemioterapia postoperatoria. Nel 2018 i ricercatori hanno fatto un altro passo avanti verso un trattamento ancora più personalizzato: hanno identificato una frazione delle pazienti i cui tumori mostrano caratteristiche che indicano che possono fare a meno della chemioterapia, evitando gli effetti collaterali.

La marcia verso una medicina personalizzata, o di precisione, sta accelerando grazie ai progressi degli strumenti diagnostici. Queste tecnologie possono aiutare a rilevare e quantificare molti biomarcatori (molecole che segnalano un disturbo) per dividere i pazienti in sottogruppi diversi per suscettibilità a una malattia, prognosi o probabilità che rispondano a un dato trattamento.

Nei primi strumenti diagnostici molecolari si osservavano singole molecole; nel caso del diabete, per esempio, il glucosio. Nell'ultimo decennio però le cosiddette tecnologie «-omiche» hanno fatto progressi enormi, permettendo di sequenziare in modo rapido, affidabile ed economico il genoma di una persona, o di misurare i livelli di tutte le proteine (proteoma), i prodotti del metabolismo intermedio (metaboloma) o i microbi (microbioma) in un fluido biologico o in un campione di tessuto. Allo stesso tempo l'uso frequente di queste tecnologie ha iniziato a produrre grandi insiemi di dati che l'intelligenza artificiale può analizzare per scoprire nuovi biomarcatori clinicamente significativi. La combinazione di tecnologie -omiche e intelligenza artificiale apre la strada alla nuova era della diagnostica avanzata, che cambierà comprensione e trattamento di molte malattie, permettendo di stabilire le terapie in base al profilo molecolare dei pazienti.

Alcuni strumenti diagnostici avanzati sono già in uso per il cancro. Oncotype DX esamina 21 geni, ed è il test che ha rivelato che molte donne con tumori al seno possono risparmiarsi la chemioterapia.

farmaci noti (e delle molecole candidate), insieme alle loro proprietà, gli strumenti di apprendimento automatico possono costruire librerie virtuali di nuovi composti con caratteristiche simili e potenzialmente più utili. Questa capacità sta accelerando l'identificazione di possibili farmaci promettenti.
Quasi 100 *start-up* esplorano le possibilità dell'IA per scoprire farmaci, tra cui Insilico Medicine, Kebotix e BenevolentAI; quest'ultima ha raccolto 115 milioni di dollari per estendere la sua tecnologia alla scoperta di farmaci per le malattie che colpiscono i motoneuroni, come il Parkinson e altri disturbi difficili da curare. BenevolentAI applica l'IA allo sviluppo dei farmaci, dalla scoperta di molecole alla progettazione e all'analisi delle sperimentazioni per dimostrarne sicurezza ed efficacia negli esseri umani.
Nel campo dei materiali, aziende come Citrine Informatics usano approcci simili a quelli dei produttori di farmaci e collaborano con grandi aziende come BASF e Panasonic per accelerare l'innovazione. Anche gli Stati Uniti sostengono le ricerche sulla progettazione aiutata dall'IA. Dal 2011 hanno investito oltre 250 milioni di dollari nella Materials Genome Initiative, che realizza un'infrastruttura che include l'IA e altri approcci computazionali per accelerare lo sviluppo di materiali avanzati.
L'esperienza insegna che nuovi materiali e prodotti chimici possono creare pericoli imprevisti per salute e sicurezza. Ma gli approcci basati sull'IA dovrebbero prevedere e ridurre questi esiti indesiderati. Le tecnologie sembrano molto vicine ad aumentare velocità ed efficacia con cui nuove molecole e materiali sono scoperti e messi sul mercato, dove possono migliorare cure mediche e agricoltura, far risparmiare risorse e far progredire produzione e stoccaggio dell'energia da fonti rinnovabili.

Un altro, FoundationOne CDx, individua mutazioni di oltre 300 geni nei tumori solidi, e indica quali farmaci contro geni specifici possono essere utili per un paziente.
Uno strumento interessante riguarda l'endometriosi, condizione in cui tessuto uterino cresce dove non dovrebbe, causando spesso forti dolori. In genere, la diagnosi si fa per via chirurgica. Un test non invasivo di DotLabs, basato sulla saliva, identifica l'endometriosi misurando un gruppo di piccole molecole dette micro-RNA. Inoltre sono in fase di sviluppo test ematici per aiutare a identificare disturbi cerebrali – come autismo, Parkinson e Alzheimer – oggi diagnosticati con la soggettiva valutazione dei sintomi da parte dei medici. I ricercatori esplorano anche la possibilità che sequenziando il genoma, analizzando il microbioma e misurando i livelli di centinaia di proteine e metaboliti in persone sane si possano ottenere indicazioni personalizzate su come ognuna potrebbe prevenire le malattie.
Un'avvertenza: strutture e ricercatori che usano strumenti diagnostici così approfonditi devono applicare rigorose misure per la privacy dei pazienti. Inoltre sono necessarie chiare normative e linee guida per valutare l'utilità dei biomarcatori come strumenti diagnostici in modo coerente, che serviranno ad accelerare l'adozione dei nuovi biomarcatori nella pratica medica.
La diagnostica avanzata inizia a dissolvere l'approccio standard a diagnosi e trattamento delle malattie. Indirizzando i pazienti a cure più valide, potrebbero anche ridurre la spesa sanitaria. Un giorno potremmo avere una *cloud* con dati sui biomarcatori, che cresce nel tempo e su cui sono basate le cure, a prescindere dal medico o dalla struttura a cui ci rivolgiamo.

Gene drive, ma con la sicura

Come limitare i rischi di una tecnologia in grado di alterare intere specie

di Cynthia H. Collins

La ricerca su una tecnica di ingegneria genetica che può modificare in via permanente i tratti di una popolazione o anche di un'intera specie procede in modo spedito. L'approccio usa i cosiddetti *gene drive*, elementi genetici trasmessi dai genitori a una frazione insolitamente alta della prole, che quindi si diffondono con rapidità nelle popolazioni.
I gene drive si osservano in natura, ma possono anche essere ingegnerizzati, e farlo potrebbe essere vantaggioso per gli esseri umani in molti modi. Si potrebbe impedire agli insetti di trasmettere la malaria e altre terribili infezioni, migliorare i raccolti alterando gli organismi che attaccano le piante, rendere i coralli resistenti agli stress ambientali e impedire a piante e animali invasivi di distruggere gli ecosistemi. I ricercatori tuttavia sono ben consapevoli del fatto che alterare o addirittura eliminare una specie potrebbe avere conseguenze profonde. Come risposta, stanno sviluppando regole che governino il passaggio dei gene drive dal laboratorio ai futuri test sul campo e infine a un uso più esteso.
Sono decenni che gli scienziati lavorano su come usare i gene drive per combattere malattie e per altri problemi. Negli ultimi anni una grossa spinta è stata data dalla tecnica di editing genomico CRISPR, grazie a cui è diventato semplice inserire materiale genetico in punti specifici dei cromosomi. Nel 2015 diversi articoli scientifici hanno riferito di aver diffuso con successo gene drive basati sulla CRISPR in lieviti, moscerini della frutta e zanzare. Una di queste dimostrazioni ha diffuso un gene per la resistenza al parassita malarico in una popolazione di zanzare, il che, in teoria, dovrebbe limitare la trasmissione del parassita. Un altro studio ha interferito con la fertilità delle femmine di una diversa specie di zanzara.
Nel 2018 è stato testato un sistema di gene drive con CRISPR nei topi, che puntava a manipolare il colore del manto; la procedura ha funzionato solo nelle femmine. Anche così, però i risultati confermano la possibilità che questa tecnologia contribuisca a eliminare o alterare popolazioni invasive di topi o altri mammiferi che minacciano i raccolti o altre specie selvatiche, oppure che trasmettono malattie.
La statunitense Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) è fra gli investitori che appoggiano questa tecnologia con entusiasmo, avendo riversato 100 milioni di dollari su ricerche mirate a combattere, con gene drive, malattie trasmesse dalle zanzare e roditori invasivi. La Bill & Melinda Gates

Foundation ha investito 75 milioni di dollari in un consorzio di ricerca che lavora a un gene drive contro la malaria.
Nonostante tutte le promesse, questa tecnologia solleva molte preoccupazioni. È possibile un gene drive che salti inaspettatamente ad altre specie selvatiche e le danneggi? Quali rischi possono esserci se dall'ecosistema si eliminano determinate specie? È possibile che malintenzionati usino gene drive per interferire, per esempio, con l'agricoltura?
Nel tentativo di scongiurare queste preoccupanti prospettive, un gruppo di ricerca ha inventato un interruttore che deve essere acceso somministrando una particolare sostanza affinché il gene drive possa funzionare. In parallelo, parecchi gruppi sono al lavoro per definire protocolli che guidino il percorso attraverso tutti i singoli passaggi della sperimentazione sul campo dei gene drive. Nel 2016, per esempio, le National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine degli Stati Uniti hanno riesaminato le ricerche e formulato raccomandazioni per definire pratiche responsabili. E nel 2018 un ampio gruppo internazionale ha formulato un percorso da seguire per il passaggio della ricerca dagli studi di laboratorio al rilascio sul campo. Il gruppo ha preso come caso modello per le sue raccomandazioni l'uso dei gene drive per il controllo della malaria in Africa, dove, dicono gli esperti, si potrebbero avere i massimi benefici per la salute delle popolazioni.

Molti ricercatori vogliono evitare anche incidenti e passi falsi che potrebbero provocare contraccolpi normativi oppure a livello di opinione pubblica

Oltre a limitare i rischi inerenti alla tecnologia in sé, molti ricercatori vogliono evitare incidenti e passi falsi che potrebbero provocare contraccolpi normativi o a livello di opinione pubblica. In un saggio del 2017 sul possibile uso di gene drive per eliminare mammiferi infestanti, Kevin M. Esvelt, del Massachusetts Institute of Technology, e Neil J. Gemmel, dell'Università di Otago, in Nuova Zelanda, temevano che un incidente internazionale potesse rallentare la ricerca di almeno un decennio. «Solo per la malaria – prevedevano – probabilmente il costo di un simile ritardo potrebbe essere misurato in decine di milioni di morti altrimenti prevenibili».

PER APPROFONDIRE

The Top 10 Emerging Technologies of 2017. Scientific American e World Economic Forum, dicembre 2017.

Le promesse della plasmonica. Atwater H.A., in «Le Scienze» n. 467, settembre 2007.

Terapie shock. Tracey K.J., in «Le Scienze» n. 561, maggio 2015.

La lotta alla malaria con il gene drive. Crisanti A. e Galizi R., in «Le Scienze» n. 594, febbraio 2018.

Collegamenti quantistici. Monroe C.R., Schoelkopf R.J. e Lukin M.D., in «Le Scienze» n. 575, luglio 2016.

Le nostre controfigure digitali. Domingos P., in «Le Scienze» n. 603, novembre 2018.

Trovare tossine con la plasmonica

Nanomateriali attivati dalla luce stanno rivoluzionando il settore dei sensori

di Javier Garcia Martinez

Scrivendo nel 2007 su «Le Scienze», Harry A. Atwater del California Institute of Technology ha formulato una previsione: una tecnologia, che chiamava «plasmonica», avrebbe potuto trovare una serie di applicazioni, da sensori biologici ad alta sensibilità fino al «mantello dell'invisibilità». Una decina di anni dopo alcune tecnologie plasmoniche sono una realtà commerciale e altre stanno passando dal laboratorio al mercato.
Si basano sul controllo delle interazioni tra un campo magnetico

Algoritmi per computer quantistici

Gli sviluppatori stanno perfezionando programmi pensati per girare sui computer quantistici

di Alán Aspuru-Guzik

Nel giro di qualche anno i computer quantistici potrebbero raggiungere o anche superare le prestazioni di quelli classici grazie al significativo lavoro su hardware e algoritmi specifici.
I computer quantistici sfruttano la meccanica quantistica per eseguire i calcoli. L'unità base di questi calcoli, il *qubit*, è analogo ai consueti bit (0 oppure 1), ma si trova in una sovrapposizione dei due stati computazionali quantistici: può essere allo stesso tempo sia 0 che 1. Questa proprietà, insieme a un'altra esclusiva dei sistemi quantistici detta *entanglement*, può permettere ai computer quantistici di risolvere certe classi di problemi in modo

ed elettroni liberi di un metallo (tipicamente oro o argento), che rendono conto delle proprietà ottiche e di conduttività elettrica del metallo stesso. Quando sono colpiti dalla luce, gli elettroni liberi sulla superficie di un metallo oscillano collettivamente, formando un cosiddetto «plasmone di superficie». Se il pezzo di metallo è abbastanza grande, gli elettroni liberi riflettono la luce che li colpisce, dando al materiale lucentezza. Ma se misura solo pochi nanometri, i suoi elettroni liberi sono confinati in uno spazio ridotto, che ne limita le possibili frequenze di vibrazione. La frequenza di oscillazione dipende dalle dimensioni della nanoparticella del metallo. In un fenomeno detto risonanza, il plasmone assorbe solo la frazione della luce incidente che oscilla alla stessa frequenza del plasmone (il resto della luce è riflesso). Questa risonanza di superficie può essere sfruttata per realizzare nanoantenne, celle solari efficienti e altri dispositivi.

Una delle applicazioni meglio studiate dei materiali plasmonici sono sensori per rilevare agenti chimici e biologici. In uno degli approcci, i ricercatori rivestono un nanomateriale plasmonico con una sostanza che si lega alla molecola di interesse, per esempio una tossina batterica. In assenza della tossina, la luce che colpisce il materiale è riemessa a un certo specifico angolo. Se invece è presente, la tossina altera la frequenza del plasmone di superficie e, di conseguenza, l'angolo della luce riflessa. Questo effetto può essere misurato con grande precisione, permettendo di rilevare e misurare anche tracce minime della tossina. Alcune start-up stanno sviluppando prodotti basati su questo o su approcci analoghi: un sensore interno per batterie che permette di monitorarne l'attività come aiuto per aumentarne densità di energia e velocità di carica, o un dispositivo per distinguere le infezioni virali da quelle batteriche. La plasmonica avanza anche nel campo dei dispositivi magnetici di memorizzazione su disco. Per esempio, nei dispositivi di registrazione magnetica termo-assistiti si migliora la capacità di memoria riscaldando brevemente minuscoli punti del disco durante la scrittura.

Nel campo della medicina si sta testando in trial clinici la possibilità di curare il cancro con nanoparticelle attivate dalla luce. Le nanoparticelle sono somministrate nel sangue e poi si concentrano nel tumore. Infine si illumina la massa tumorale con luce della stessa frequenza del plasmone di superficie, provocando il riscaldamento delle particelle per risonanza; il calore uccide selettivamente le cellule tumorali senza danneggiare il tessuto sano circostante.

Le aziende che sfrutteranno la plasmonica dovranno assicurare prodotti a prezzo ragionevole, affidabili, robusti e facili da fabbricare su larga scala e da integrare con altri componenti. Malgrado le difficoltà, le prospettive sono brillanti. L'arrivo dei metamateriali – materiali sintetici a nanoscala in cui i plasmoni generano effetti ottici inconsueti – ha permesso di usare materiali diversi da oro e argento, come grafene e semiconduttori. Future Market Insights predice che il valore del mercato nordamericano per le sole applicazioni ai sensori crescerà dai 250 milioni di dollari del 2017 a 470 milioni entro il 2027.

più efficiente di qualunque computer convenzionale. È una tecnologia entusiasmante, ma anche notoriamente esigente.

Un processo detto decoerenza, per esempio, può distruggerne la funzionalità. I ricercatori hanno determinato che un computer quantistico dotato di qualche migliaio di qubit e strettamente controllato potrebbe essere messo in condizione di resistere alla decoerenza mediante una tecnica detta di correzione quantistica degli errori. Ma i più grossi computer quantistici sviluppati finora in laboratorio – gli esempi più notevoli vengono da IBM, Google, Rigetti Computing e IonQ – contengono solo qualche decina di qubit. Queste versioni, che John Preskill del California Institute of Technology chiama computer NISQ (la sigla sta per «quantistici rumorosi a scala intermedia»), non sono ancora in grado di eseguire la correzione degli errori. Eppure, un'esplosione di ricerche su algoritmi ideati specificamente per i computer NISQ potrebbe mettere questi dispositivi in grado di eseguire alcuni calcoli con più efficienza dei computer tradizionali.

Un più ampio accesso alle macchine NISQ da parte di utenti di tutto il mondo ha contribuito a questo progresso, permettendo a un numero crescente di ricercatori di sviluppare e testare versioni su scala ridotta di programmi per queste macchine. E sta fiorendo anche un ecosistema di start-up che si concentrano su aspetti diversi del software quantistico.

I ricercatori trovano promettenti due tipi di algoritmi per i NISQ: quelli di simulazione e quelli di apprendimento automatico.

Nel 1982 il fisico teorico Richard Feynman aveva suggerito che una delle applicazioni più potenti dei computer quantistici sarebbe stata la simulazione della natura stessa: atomi, molecole e materiali. Molti ricercatori, me compreso, hanno sviluppato algoritmi per simulare molecole e materiali su dispositivi NISQ (e su computer quantistici a correzione d'errore totale del futuro). Questi algoritmi potrebbero migliorare la progettazione di nuovi materiali da usare in campi che vanno dall'energia alla medicina. Inoltre gli addetti ai lavori stanno valutando la possibilità che i computer quantistici siano migliori nei compiti di apprendimento automatico, in cui i computer apprendono da grandi insiemi di dati o dall'esperienza. I testi effettuati su un gruppo sempre più grande di algoritmi per dispositivi NISQ hanno mostrato che i computer quantistici possono facilitare compiti di apprendimento automatico come classificare informazioni in categorie, raggruppare insieme oggetti o caratteristiche e generare nuovi campioni statistici da quelli esistenti, per esempio per prevedere quali strutture molecolari potrebbero avere un certo insieme di proprietà desiderate. Almeno tre gruppi di ricerca hanno riferito progressi nello sviluppo di versioni quantistiche di un approccio all'apprendimento automatico che usa le cosiddette reti antagoniste generative (GAN), che da diversi anni a questa parte ha conquistato di slancio il campo.

Un certo numero di algoritmi sembra funzionare bene sulle macchine NISQ esistenti, tuttavia nessuno ha ancora esibito una prova formale del fatto che siano più potenti di quelli che possono essere fatti eseguire a computer convenzionali. Si tratta di prove difficili, e per ottenerle potrebbero essere necessari anni.

Nel giro di qualche anno probabilmente i ricercatori realizzeranno dispositivi NISQ più estesi e più controllabili, e poi macchine a correzione totale con migliaia di qubit fisici. Quelli di noi che lavorano su questi dispositivi sono ottimisti sulla possibilità che gli algoritmi per i NISQ saranno abbastanza efficaci da dare vantaggi rispetto ai computer convenzionali all'avanguardia, anche se forse dovremo aspettare che siano disponibili macchine a correzione totale degli errori.

La geometria contro l'inganno dei collegi

I matematici stanno mettendo a punto metodi per identificare le mappe politiche che privano di diritti gli elettori

di Moon Duchin

Il *gerrymandering* si sta facendo strada nei tribunali e sui titoli di giornale di tutti gli Stati Uniti. Con questo termine si indica la definizione dei collegi elettorali in modo da favorire deliberatamente uno dei partiti in lizza. La Corte Suprema ha di recente ascoltato casi sulla costituzionalità dei distretti elettorali che potrebbero aver assicurato un forte vantaggio ai Repubblicani nel Wisconsin e ai democratici nel Maryland, ma in entrambi casi ha evitato di esprimere un'opinione esplicita. Un altro caso di gerrymandering di parte, riferito al North Carolina, sta arrivando sempre più in alto, sospinto da un clamoroso giudizio di un tribunale locale nell'agosto 2018. Ma finora non è stato possibile offrire ai giudici un quadro legale soddisfacente per il gerrymandering. Uno dei problemi, come ha fatto notare l'ex giudice Anthony Kennedy in un caso del 2004, è che i tribunali a tutti i livelli devono ancora accordarsi su uno «standard attuabile» per identificare un caso di gerrymandering. Ed è qui che sempre più matematici di tutti gli Stati Uniti ritengono di poter dare una mano.

Poco più di due anni fa con alcuni amici ho fondato un gruppo per studiare le applicazioni della geometria e dell'informatica alla ridefinizione dei distretti elettorali negli Stati Uniti. Da allora il Metric Geometry and Gerrymandering Group ha ampliato i propri interessi e la propria missione, impegnandosi a fondo in ricerca, sensibilizzazione, formazione e consulenza. Più di 1200 persone hanno frequentato i nostri seminari in tutto il paese e molte sono ora coinvolte in progetti di riformulazione dei distretti. Pensiamo che sia il momento giusto per un intervento computazionale. La matematica del gerrymandering è sorprendentemente ricca – abbastanza da diventare una sottodisciplina a sé – e la potenza di calcolo sta raggiungendo la scala e la complessità di questo problema. Nonostante l'orientamento tecnico del gruppo, il nostro obiettivo principale è rafforzare e proteggere i diritti civili, e lavoriamo con avvocati, politologi, geografi e gruppi locali per costruire strumenti e idee prima del prossimo censimento degli Stati Uniti e della tornata di ridefinizione dei distretti che lo seguirà.

In un paese che conferisce il potere ai rappresentanti eletti ci saranno sempre schermaglie per il controllo del processo elettorale, e in un sistema come quello della nostra Camera dei Rappresentanti – dove da ogni distretto geografico emerge un unico vincitore – il modo di delineare i distretti elettorali è un ovvio

IN BREVE

I tentativi di formare i distretti elettorali in modo da favorire slealmente uno dei partiti hanno provocato cause legali in varie parti degli Stati Uniti. Ma i tribunali non hanno norme concrete per identificare questa pratica, detta «gerrymandering».

Negli ultimi anni i matematici sono scesi in campo per sviluppare metodi statistici che la magistratura può usare per individuare le manipolazioni dei distretti e per agire come esperti dentro e fuori dalle aule dei tribunali.

Le possibili divisioni di uno Stato in distretti sono tante che valutarle è diventato un problema enorme anche per i computer più veloci. I giudici si mostrano però ben disposti nei confronti dei cosiddetti metodi Monte Carlo basati su catene di Markov, che sono all'altezza del compito.

Illustrazione di Hanna Barczyk

Moon Duchin è professoressa associata di matematica e *senior fellow* al Jonathan M. Tisch College of Civil Life della Tufts University. Si occupa di teoria geometrica dei gruppi, di topologia a bassa dimensione e di dinamica. Nell'autunno 2016 ha dato vita al Metric Geometry and Gerrymandering Group, per concentrare l'attenzione dei matematici sulla riformulazione dei distretti elettorali.

campo di battaglia. La storia statunitense è piena di casi di ridefinizioni, dal riempire un distretto con i fedelissimi di un deputato in carica al dividere in tre un distretto preesistente per sopprimere il potere politico degli elettori di colore. Si usano ancora molte varianti di queste strategie di *packing* e *cracking* (mettere insieme e spezzare), e nell'epoca *dei big data* si sono fatte più sofisticate. Ora è difficilissimo anche identificare con certezza una riorganizzazione in malafede. Si ritiene che il gerrymandering sia riconoscibile da due tratti distintivi, le forme bizzarre dei distretti e i risultati elettorali sproporzionati, ma nessuno dei due è affidabile. Quindi, come facciamo a determinare quando la bilancia è truccata?

La verifica a occhio

L'episodio del 1812 da cui deriva la parola *gerrymander* scaturì dall'intuizione che distretti dalle forme strane celano obiettivi illegittimi. Il nome deriva da Elbridge Gerry, che all'epoca era governatore del Massachusetts. Gerry aveva un ottimo curriculum come padre fondatore – firmatario della Dichiarazione d'indipendenza, uno dei principali partecipanti della Convenzione costituzionale degli Stati Uniti, membro del Congresso [il Parlamento degli Stati Uniti, N.d.R.], vice del presidente degli Stati Uniti James Madison – e quindi fa sorridere che la sua fama derivi da una disonesta ridefinizione dei distretti. «Gerry-mander», cioè la salamandra di Gerry, fu il nome satirico dato a un distretto sinuoso della North Shore di Boston che si ritenne potesse favorire il partito democratico-repubblicano del governatore rispetto ai rivali federalisti. Nel 1813 sulla «Salem Gazette» apparve una vignetta satirica in cui ai contorni del distretto erano allusivamente aggiunti ali, artigli e zanne per accentuarne l'aspetto di rettile contorto.

Gerrymander è il nome satirico dato in una vignetta a un sinuoso distretto elettorale nel 1812

Dunque, l'idea che distretti dalla forma irregolare segnalino scorrettezze è antica, e il concetto opposto secondo cui distretti regolari promuoverebbero gli ideali democratici è vecchio quanto la repubblica. Nel 1787 Madison scrisse in *The Federalist Papers* che «il limite naturale di una democrazia è la distanza dal punto centrale, che permetta anche ai cittadini che vivono più lontano di partecipare alle assemblee ogni volta che le loro funzioni pubbliche lo richiedono». In altre parole, i distretti devono essere facili da percorrere. Nel 1901 una legge sulla ripartizione fu la prima occasione in cui nella legislazione degli Stati Uniti apparve un vago auspicio che i distretti fossero composti di «territorio compatto». La parola «compatto» proliferò poi nel panorama legale della riorganizzazione dei distretti, ma quasi sempre senza una definizione.

Per esempio, in occasione di un incontro del 2017 della National Conference of State Legislatures ho appreso che dopo l'ultimo censimento i legislatori dello Utah hanno creato un sito web, Redistrict Utah, per sollecitare mappe dei distretti elettorali proposte dai cittadini. Per essere considerate, le mappe dovevano essere «ragionevolmente compatte». Ho colto al volo l'occasione per scoprire quale fosse di preciso il modo in cui era verificata e applicata questa caratteristica, ma ho appreso che la si gestiva semplicemente scartando le mappe dall'aspetto strano. Se come criterio non vi entusiasma, sappiate che lo Utah non è solo. Trentasette Stati hanno in teoria regolamenti di qualche tipo sulla forma dei distretti, e in quasi tutti i casi regna sovrano il metodo «a occhio».

Il problema è che la sagoma di un distretto, da sola, non dice molto, e spesso può essere fuorviante. Da un lato ci possono essere motivi ineccepibili per una forma irregolare: può essere influenzata dalla geografia fisica o da tentativi ragionevoli di seguire i confini delle contee o di unire comunità omogenee, anche se altrettanto spesso priorità legittime come queste sono solo un pretesto per difendere distretti formulati in malafede. Viceversa, i distretti di forma arrotondata, compatta e simmetrica non offrono vere garanzie. Nel 2018 un piano di riorganizzazione dei distretti della Pennsylvania redatto dai Repubblicani ha ottenuto elevati punteggi di compattezza secondo tutte e cinque le formule specificate dalla Corte Suprema della Pennsylvania, ma un'analisi matematica ha rivelato che questa conformazione avrebbe mantenuto la stessa asimmetria estrema e partigiana di quella ben più contorta, emanata nel 2011, che avrebbe dovuto sostituire. Quindi i giudici hanno preso la decisione straordinaria di adottare un piano di un esterno indipendente.

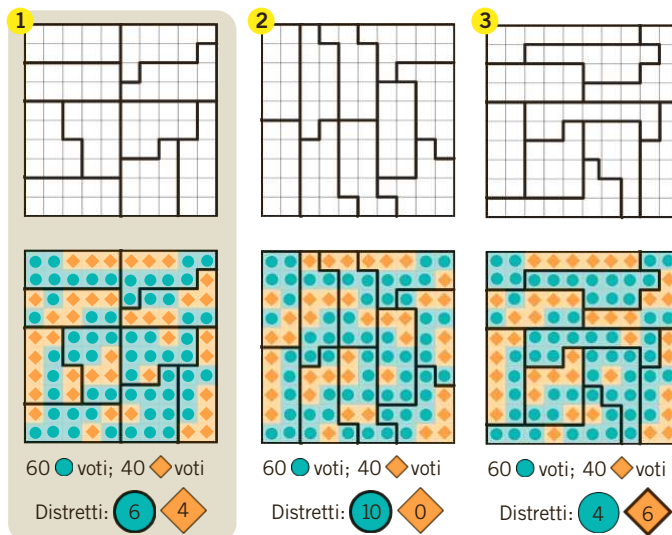
Risultati non conformi

Se la forma non è un indicatore attendibile del gerrymandering, può essere utile studiare in che misura i rappresentanti eletti sono conformi alle percentuali di voto dell'elettorato? Sicuramente esiti non conformi daranno prove evidenti di abusi. E invece non è detto. Consideriamo i Repubblicani nel mio Stato d'origine, il Massachusetts. Nelle 13 elezioni federali per il presidente e il Senato a partire dal 2000, i candidati del Grand Old Party hanno ottenuto in media più di un terzo dei voti in tutto lo Stato. È sei volte quanto sarebbe necessario per vincere un seggio in uno dei nove distretti congressuali del Massachusetts, poiché nelle competizioni fra due candidati basta una maggioranza semplice per vincere. Eppure nessun Repubblicano ha ottenuto un seggio alla Camera dal 1994.

Quindi è senz'altro un caso di gerrymandering che ha negato ai Repubblicani i seggi che spettano loro, giusto? No, perché grazie alla matematica sappiamo che non ci sono responsabilità. Studiamo i confronti a livello dell'intero Stato, per evitare di dover tenere conto di casi in cui c'è un solo candidato e di altre variabili che confondono la situazione. Consideriamo Kenneth Chase, lo sfidante repubblicano di Ted Kennedy per il Senato degli Stati Uniti nel 2006, che ottenne il 30 per cento dei voti nello Stato. In proporzione ci aspetteremmo che Chase abbia battuto Kennedy in quasi tre dei nove distretti congressuali, invece i numeri non dicono que-

Il potere di una penna

Il gerrymandering si basa su confini tracciati ad arte, in modo da diluire il potere di voto di una parte della popolazione e favorirne un'altra, raggruppando gli elettori di una parte in pochi distretti con numeri sproporzionatamente alti (packing, «mettere insieme»), disperdendoli in diversi distretti in modo che non riescano a eleggere un loro candidato (cracking, «spezzare») o usando una combinazione dei due metodi.

Una griglia è divisa in distretti in modo da ottenere un risultato elettorale proporzionale alla percentuale di voti di ciascun partito 1. Usando il packing e il cracking, la stessa griglia si può dividere in distretti in modo da dare i risultati estremi 2 e 3: uno in cui il partito Azzurro vince tutti i distretti e uno in cui vince solo in quattro su 10. In questo caso particolare, la geometria della disposizione degli elettori si rivela mediamente favorevole al partito Azzurro. Analisi statistiche che fanno uso dei metodi Monte Carlo basati su catene di Markov mostrano che il partito Arancione ha molte più probabilità di ottenere due o tre seggi, rispetto alla sua quota proporzionale di quattro, nell'universo delle possibili suddivisioni.

sto. Si scopre che è matematicamente impossibile selezionare anche un solo raggruppamento – delle dimensioni di un distretto – di città o altre unità amministrative, pure sparse per lo Stato, che preferivano Chase. Il fatto è che i suoi elettori non erano abbastanza raggruppati. Nella maggior parte delle unità amministrative i voti per Chase erano a livelli vicini alla media dell'intero Stato, quindi non c'erano componenti a favore di Chase con cui lavorare.

Ogni minoranza nell'elettorato ha bisogno di un certo livello di non uniformità nel modo in cui sono distribuiti i suoi voti affinché il nostro sistema basato sui distretti le possa offrire un'opportunità anche solo teorica di vederne garantita la rappresentanza. E il tipo di analisi applicato alla competizione Chase-Kennedy non tiene neppure conto dei fattori spaziali, come l'usuale requisito secondo cui ogni distretto è connesso. Ci si può giustamente chiedere come potremo mai ravvisare delle responsabilità in chi traccia i confini dei distretti, quando il panorama delle possibilità può riservare tante sorprese.

Ci aiutano le passeggiate aleatorie

L'unico modo ragionevole per valutare obiettivamente l'equità di un piano di formulazione dei distretti è confrontarlo con altri piani validi per dividere la stessa giurisdizione, perché è necessario tenere conto di quanto, nei risultati elettorali, è influenzato dalle leggi dello Stato, dalla demografia e dalla geografia. Il problema è che studiare l'universo delle possibili divisioni diventa un problema intrattabile.

Pensiamo a una semplice griglia 4 × 4 e supponiamo di volerla dividere in quattro distretti contigui di dimensioni uguali, composti da quattro quadrati ciascuno. Se immaginiamo la griglia come parte di una scacchiera e interpretiamo la contiguità nel senso che una torre deve poter visitare l'intero distretto, ci sono esattamente 117 modi per farlo. Se consideriamo adiacenti anche due caselle in contatto solo per un angolo – l'adiacenza in base alle mosse della regina – allora ci sono 2620 modi, e tutti questi modi non sono neppure tanto semplici da contare. Come dice il mio collega Jim Propp, professore all'Università del Massachusetts a Lowell e tra i massimi esperti nel campo dell'enumerazione combinatoria: «In una dimensione, possiamo dividere un percorso seguendo il principio *divide et impera*, ma in due dimensioni improvvisamente c'è un numero enorme di modi per andare dal punto A al punto B».

Il problema è che spesso le migliori tecniche di conteggio si basano sulla ricorsione – cioè sulla risoluzione di un problema in termini di un problema simile, più piccolo di un passo – ma i problemi di conteggio spaziale bidimensionale non si prestano bene alla ricorsione senza una struttura ulteriore. Quindi le enumerazioni complete devono basarsi sulla forza bruta. Anche un computer portatile, programmato in modo intelligente, può classificare quasi istantaneamente le partizioni di griglie piccole, mentre ci sono enormi salti di complessità via via che le dimensioni della griglia crescono: l'obiettivo si allontana rapidamente, fino a essere fuori dalla nostra portata. Quando si arriva a una griglia 9 × 9 ci sono più di 700.000 miliardi di soluzioni per le partizioni «a torre», e anche un computer ad alte prestazioni ha bisogno di una settimana per contarle tutte. Sembra proprio che non ci sia speranza. Stiamo cercando di valutare i modi per dividere uno Stato, ma non riusciamo a enumerare l'universo delle alternative, tanto meno a svolgervi confronti significativi. In questa situazione pare di brancolare nel buio in un deserto infinito.

La buona notizia è che esiste uno standard usato in tutti i campi scientifici per obiettivi così colossali: i metodi Monte Carlo basati su catene di Markov (MCMC). Le catene di Markov sono passeggiate casuali in cui, a ogni passo, il successivo è scelto probabilisticamente e dipende solo dalla posizione attuale (in ogni posizione si tirano i dadi per scegliere uno spazio adiacente in cui spostarsi). I metodi Monte Carlo sono stime mediante campionamenti casuali. Messi insieme, danno uno strumento potente per studiare vasti spazi di possibilità. MCMC è stato usato con successo per decodificare messaggi inviati dalle prigioni, sondare le proprietà e le transizioni di fase dei liquidi, trovare approssimazioni rapide e con una precisione garantita per problemi di calcolo complessi, e molto altro ancora. Uno studio del 2009 dello statistico Persi Diaconis ha stimato che MCMC è alla base del 10-15 per cento del lavo-

Illustrazioni di Jen Christiansen

Confrontare innumerevoli divisioni in distretti

Dimensioni; distretti		Distretti tutti delle stesse dimensioni	I distretti possono avere dimensioni diverse (+/–1)
griglia 2×2;	2	2	6
griglia 3×3;	3	10	58
griglia 4×4;	2	70	206
griglia 4×4;	4	117	1953
griglia 4×4;	8	36	34.524
griglia 5×5;	5	4006	193.152
griglia 6×6;	2	80.518	?*
griglia 6×6;	3	264.500	?
griglia 6×6;	4	442.791	?
griglia 6×6;	6	451.206	?
griglia 6×6;	9	128.939	?
griglia 6×6;	12	80.092	?
griglia 6×6;	18	6728	?
griglia 7×7;	7	158.753,814	?
griglia 8×8;	8	187.497,290,034	?
griglia 9×9;	9	706.152,947,468,301	?

Le catene di Markov sono percorsi aleatori all'interno di un grafo o una rete in cui la destinazione successiva è determinata da un evento probabilistico, come un lancio di dadi, in funzione della posizione attuale. I metodi Monte Carlo usano campionamenti casuali per stimare una distribuzione di probabilità. Messi insieme, i metodi Monte Carlo basati su catene di Markov (MCMC) sono un potente strumento per analizzare e campionare un vasto spazio di scenari, come tutte le possibili divisioni in distretti di uno Stato. Da decenni si cerca di usare l'analisi computazionale per individuare distretti truccati, ma l'applicazione di MCMC al problema è molto più recente.

Caso semplice

È facile enumerare tutti i modi per dividere una piccola griglia in distretti di dimensioni uguali. Per una griglia 2 × 2 con due distretti di uguali dimensioni, ci sono solo due soluzioni. Ma se i distretti variano di dimensioni, il numero di soluzioni salta a sei.

** I matematici non hanno ancora enumerato queste soluzioni, che possono richiedere una settimana di calcolo o più. Per saperne di più sulla caccia a questi numeri: www.mggg.org.*

ro statistico nelle scienze, in ingegneria e nell'industria, e da allora probabilmente la percentuale è aumentata. Sebbene l'analisi computazionale nello studio dei distretti risalga ormai a diversi decenni fa, i tentativi seri di applicare MCMC hanno iniziato ad apparire pubblicamente solo verso il 2014.

Immaginate che le autorità dello Stato di Grigliolandia vi assumano per decidere se la loro divisione in distretti elettorali è ragionevole. Se Grigliolandia è una griglia quadrata 4 × 4 e la sua costituzione prevede distretti contigui rispetto alla mossa della torre, siete fortunati: ci sono esattamente 117 modi per ottenere una divisione con questi requisiti, e li potete esaminare tutti. È possibile impostare un modello fedele di questo universo di divisioni, usando 117 nodi che rappresentano le divisioni valide, in cui due nodi sono collegati da uno spigolo se si può passare dall'uno all'altro mediante una mossa semplice in cui due quadrati della griglia si scambiano le assegnazioni ai distretti. Questi spigoli danno un modo di concettualizzare quanto siano simili due divisioni, semplicemente contando il numero di scambi necessari per trasformarle una nell'altra. (Chiamo questa struttura un «metagrafo» perché è un grafo che rappresenta i modi per dividere un altro grafo.) Ora supponiamo che la legislatura dello Stato sia controllata dal partito dei Diamanti, e che gli avversari sospettino che abbiano truccato i distretti a loro favore. Per stabilire se è vero, possiamo considerare i risultati delle elezioni. Se nelle ultime elezioni la divisione scelta dai Diamanti ha portato a un numero di loro seggi maggiore, per esempio, di quanto sarebbe successo in 114 alternative su 117, e se lo stesso è vero per varie elezioni precedenti, questa divisione è chiaramente anomala dal punto di vista statistico. Sarebbe una prova convincente di un gerrymandering di parte, e non c'è bisogno di MCMC per questa analisi.

Il metodo MCMC entra in gioco quando abbiamo un problema di dimensioni normali anziché questo piccolo problema-giocattolo. Non appena si superano i 100 nodi o giù di lì, c'è un metagrafo analogo, ma non è possibile costruirlo completamente a causa della sua complessità. La cosa non ci scoraggia, però. Per ognuna delle divisioni è ancora facile costruirne l'intorno locale eseguendo tutte le mosse possibili. A questo punto possiamo svolgere un milione, un miliardo o 1000 miliardi di passi e vedere che cosa troviamo. Questo ha una base matematica (la teoria ergodica, per la precisione) che garantisce che se camminiamo a caso per un tempo abbastanza lungo, l'insieme di mappe che raccogliamo avrà proprietà rappresentative dell'universo generale, in genere molto prima di aver visitato anche solo una piccola percentuale dei nodi nel nostro spazio degli stati. Ciò permette di determinare se la mappa che valutiamo sia anomala in base a varie metriche di faziosità.

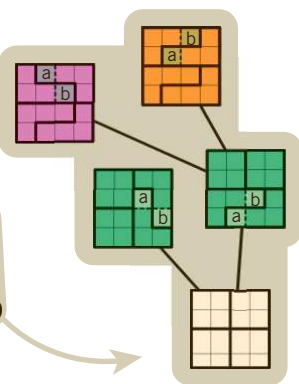
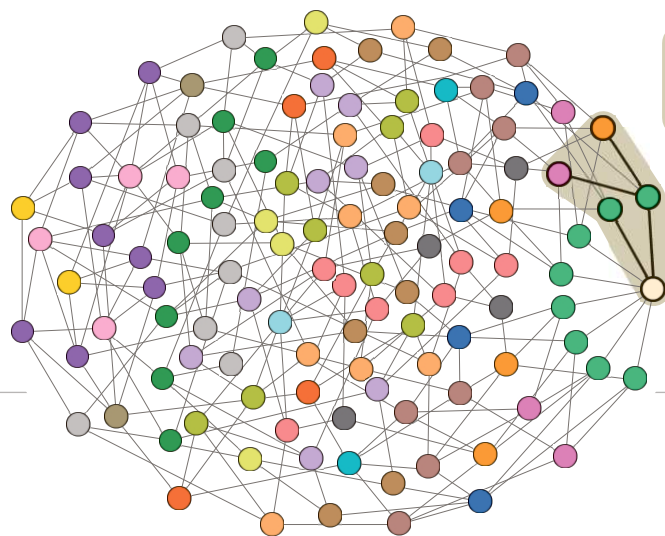
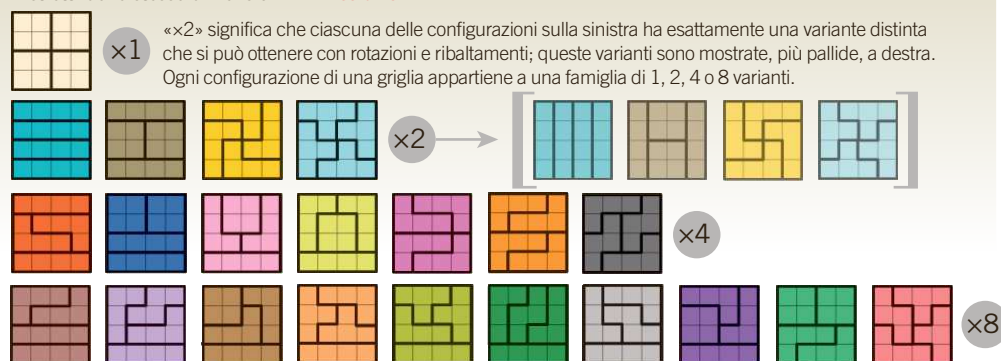
L'area più avanzata della ricerca in questo campo consiste nella costruzione di algoritmi più potenti e, allo stesso tempo, nella messa a punto di nuovi teoremi che certificano che i nostri campionamenti sono buoni a sufficienza per trarre conclusioni solide. Nella comunità scientifica c'è comunione di vedute su questo metodo, ma anche molte direzioni di ricerca in corso.

Riposa in pace, governatore Gerry

Finora i tribunali sembrano vedere di buon occhio questo approccio. Due matematici – Jonathan Mattingly, della Duke University, e Wes Pegden, della Carnegie Mellon University – hanno testimoniato di recente sugli approcci con il metodo MCMC, rispettivamente, per la causa federale in North Carolina e quella a livello statale in Pennsylvania.

Mattingly ha usato MCMC per caratterizzare la varietà che si

Caso più grande

Via via che la dimensione della griglia cresce, il numero di modi possibili per dividerla sale alle stelle. La ripartizione di una griglia 4 × 4 in quattro distretti di uguali dimensioni ha 117 soluzioni. Se i distretti variano anche solo di un'unità, ci sono 1953 soluzioni. Presto anche i computer più potenti fanno fatica a enumerare le possibilità per griglie più complesse, ed è un problema per individuare mappe manipolative confrontando gli innumerevoli modi per dividere in distretti uno Stato. Ma MCMC può aiutare.

Possiamo esplorare in modo efficiente le possibili divisioni in distretti muovendoci in modo casuale all'interno di un «metagrafo», definito da mosse consistenti negli scambi di singole caselle mostrati nell'immagine. Nel dettaglio evidenziato, ogni griglia presenta due quadrati indicati con **a** e **b**, le cui assegnazioni ai distretti sono scambiate ottenendo la configurazione mostrata. Gli spigoli della rete rappresentano queste semplici mosse di scambio. Il metagrafo è un modello dello spazio di tutti le divisioni valide in distretti e si può usare per campionare molti miliardi di piani. I geometri stanno cercando di capire la forma e la struttura di questo universo di suddivisioni.

Fonte: Zachary I. Schutzman e Floor van de Velde

può osservare ragionevolmente in base a varie metriche, come i seggi vinti, all'interno di gruppi di divisioni in distretti. La sua passeggiata aleatoria era ponderata in modo da favorire divisioni giudicate più vicine a un ideale, sulla falsariga della legge del North Carolina. Usando questi gruppi, ha sostenuto che il modello in atto è un'anomalia faziosa estrema. Pegden ha fatto uso di un diverso tipo di test, in cui si fa appello a un teorema rigoroso che quantifica quanto sia improbabile che una divisione neutra possa avere un punteggio molto peggiore di altre divisioni visitate da una passeggiata aleatoria. Il suo metodo produce valori *p* (*p-values*), che limitano l'improbabilità di trovare una simile anomalia per caso. I giudici hanno ritenuto credibili entrambe le argomentazioni e le hanno citate favorevolmente nelle rispettive decisioni.

Per quanto mi riguarda, il governatore della Pennsylvania Tom Wolf mi ha convocata all'inizio del 2018 come consulente per lo Stato per disegnare i nuovi confini distrettuali in seguito alla decisione della Corte Suprema di annullare il piano repubblicano del 2011. Il mio contributo è consistito nell'usare le tecniche MCMC per valutare le nuove proposte via via che arrivavano, sfruttando la potenza delle anomalie statistiche e aggiungendo nuovi modi per tenere conto di un numero maggiore di principi per la formulazione dei distretti, dalla compattezza alla divisione delle contee e alla struttura delle comunità. La mia analisi concordava con quella di Pegden nel valutare il piano del 2011 come un'anomalia faziosa estrema, e ha scoperto che il nuovo piano proposto dall'attuale legislatura era altrettanto estremo: il fatto che avesse un aspetto migliore non bastava a giustificarlo.

Con l'avvicinarsi del censimento del 2020, gli Stati Uniti si preparano a un altro turno selvaggio di riorganizzazione dei distretti e alle immancabili controversie che seguiranno. Spero che i prossimi passi non si svolgeranno solo in tribunale ma consisteranno anche in riforme che prevedano un grande insieme di mappe create con strumenti *open source*, da esaminare prima che una particolare riorganizzazione diventi legge. In questo modo i legislatori manterranno le loro tradizionali prerogative di commissionare e approvare i confini dei distretti, ma dovranno produrre garanzie del fatto che non stanno influendo troppo sul risultato finale.

L'informatica non prenderà mai decisioni vincolanti in materia di riorganizzazione e non può produrre divisioni ottimali, ma può certificare che un piano si comporta come prevedono le regole stabilite. Questo, già di per sé, può limitare gli abusi peggiori e contribuire a riportare fiducia nel sistema. ■

PER APPROFONDIRE

A Formula Goes to Court: Partisan Gerrymandering and the Efficiency Gap. Bernstein M. e Duchin M., in «Notices of the American Mathematical Society», Vol. 64, n. 9, pp. 1020-1024, ottobre 2017. **www.ams.org/journals/notices/201709/rnoti-p1020.pdf.**

Gerrymandering Metrics: How to Measure? What's the Baseline? Duchin M., in «Bulletin of the American Academy of Arts & Sciences», Vol. 71, n. 2, pp. 54-58, inverno 2018.

Election Security Is a Matter of National Security. Dill D.L., Guest blog, ScientificAmerican.com, 30 novembre 2016.

The Science of Elections. Latner M., Observations blog, ScientificAmerican.com, 14 giugno 2018.

MATEMATICA

Il problema insolubile

Dopo un viaggio intellettuale durato anni, tre matematici hanno scoperto che un problema di importanza centrale in fisica è impossibile da risolvere, e questo significa che anche altre domande importanti potrebbero essere indecidibili

di Toby S. Cubitt, David Pérez-García e Michael Wolf

Toby S. Cubitt è uno University Research Fellow della Royal Society ed è professore di informazione quantistica allo University College di Londra. Dopo un dottorato in fisica, attività postdottorato in matematica e un incarico in informatica, adesso lavora su problemi quantistici che sono a cavallo di queste aree.

David Pérez-García è professore di matematica all'Universidad Complutense di Madrid e membro dell'Instituto de Ciencias Matemáticas di Madrid. Si occupa di problemi matematici in fisica quantistica.

Michael Wolf è professore di fisica matematica nel Dipartimento di matematica del Politecnico di Monaco di Baviera. La sua ricerca si concentra sui fondamenti matematici e concettuali della meccanica quantistica.

Eravamo tutti e tre seduti in un caffè a Seefeld, una cittadina nelle Alpi austriache. Era l'estate 2012 ed eravamo bloccati. Non bloccati nel caffè; anzi, il Sole splendeva, la neve sulle Alpi era luccicante e lo splendido paesaggio ci invitava ad abbandonare il problema matematico su cui eravamo bloccati e a fare un giro fuori. Stavamo cercando di esplorare le connessioni tra i risultati matematici novecenteschi di Kurt Gödel e Alan Turing e la fisica quantistica, o almeno era questo che sognavamo di fare. Era un sogno iniziato nel 2010, durante un programma semestrale che aveva riguardato l'informazione quantistica all'Institut Mittag-Leffler, vicino a Stoccolma.

Alcuni problemi a cui ci stavamo dedicando erano già stati esplorati da altri, ma per noi quella linea di ricerca era nuova, quindi avevamo iniziato con qualcosa di semplice. In quel momento stavamo cercando di dimostrare un risultato piccolo e non molto significativo per farci un'idea della situazione. Ormai da mesi avevamo una (specie di) dimostrazione di questo risultato, ma per farla funzionare avevamo dovuto impostare il problema in modo artificiale e insoddisfacente. Avevamo l'impressione di modificare la domanda per adattarla alla risposta, e non ne eravamo molto contenti. Nel 2012, riprendendo il problema durante la pausa dopo la prima sessione di seminari del *workshop* a Seefeld che ci aveva uniti, non riuscivamo ancora a capire come uscirne. Tra il serio e il faceto uno di noi (Wolf) chiese: «Perché non dimostriamo l'indecidibilità di qualcosa a cui le persone tengono davvero, come il *gap* spettrale?».

All'epoca eravamo interessati a capire se certi problemi in fisica siano «decidibili» o «indecidibili», ovvero: è in assoluto possibile risolverli? Ci eravamo bloccati cercando di sondare la decidibilità di un problema molto più insignificante, che interessa a poche persone. Il problema del «gap spettrale» che Michael proponeva di affrontare (e di cui parleremo più avanti) è di importanza centrale per la fisica. All'epoca non sapevamo se fosse decidibile o no (ma propendevamo per il no), o se saremmo mai riusciti a dimostrare una delle due cose. Ma, se ci fossimo riusciti, i risultati sarebbero stati importantissimi per la fisica, senza contare che sarebbero stati un bel passo avanti per la matematica. L'ambiziosa proposta di Michael, buttata là quasi come un battuta, ci lanciò in una grandiosa avventura. Tre anni e 146 pagine di matematica più tardi, la nostra dimostrazione dell'indecidibilità del gap spettrale era pubblicata su «Nature».

Per capire che cosa significa dobbiamo tornare ai primi del Novecento e ripercorrere alcuni dei filoni che hanno portato alla fisica, alla matematica e all'informatica moderne. Tutte queste idee distinte si devono al matematico tedesco David Hilbert, spesso considerato il più grande rappresentante della sua disciplina degli ultimi cent'anni. (Ovviamente, al di fuori della matematica, non

IN BREVE

Negli anni trenta Kurt Gödel scoprì che di alcune affermazioni è impossibile dimostrare se siano vere o false: saranno sempre «indecidibili».

Di recente un gruppo di matematici ha deciso di scoprire se una certa questione fondamentale di meccanica quantistica, il cosiddetto problema del gap spettrale, rientra in questa categoria. Il gap spettrale si riferisce alla differenza di energia tra lo stato di energia più basso che un materiale può occupare e lo stato successivo.

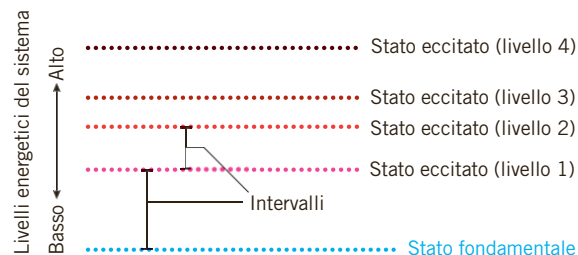
Dopo tre anni di discussioni alla lavagna, calcoli notturni e molti ragionamenti attorno a un caffè, questi matematici hanno prodotto una dimostrazione di 146 pagine per cui il problema del gap spettrale è indecidibile. Il risultato fa ritenere che anche altri problemi importanti possano esserlo.

PROBLEMA

Il gap spettrale

La dimostrazione matematica trovata dagli autori affronta il problema del «gap spettrale», cioè la differenza di energia tra lo stato fondamentale e il primo stato eccitato di un materiale. Quando pensiamo agli stati energetici, tendiamo a pensare agli elettroni negli atomi, che possono passare da un livello di energia a un altro. Mentre negli atomi c'è sempre un divario tra questi livelli, in materiali più grandi composti da molti atomi a volte non c'è distanza tra lo stato fondamentale e il primo stato eccitato: anche la più piccola quantità possibile di energia sarà sufficiente a spingere il materiale a un livello superiore di energia. Questi materiali sono definiti «privi di gap» (o «senza gap»). Gli autori hanno dimostrato che non ci sarà mai un modo per determinare, per un qualsiasi materiale, se sia dotato o privo di gap.

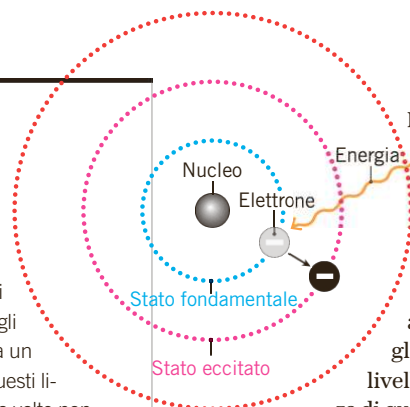
Sistema dotato di gap

Ci sono intervalli discreti tra i livelli energetici, e il materiale deve raggiungere una certa energia per passare al livello successivo.

Sistema privo di gap

Nessun divario separa lo stato fondamentale e il primo stato eccitato, e il materiale può essere eccitato con la minima immissione di energia.

ne ha sentito parlare nessuno; non è una disciplina che garantisca la via alla fama e alla celebrità, tuttavia anche questo ha i suoi vantaggi.)

La matematica della meccanica quantistica

L'influenza di Hilbert sulla matematica è stata immensa. Sviluppò tra l'altro un ramo della matematica chiamato analisi funzionale, e in particolare un'area, detta teoria spettrale, che si sarebbe rivelata la chiave del quesito di cui si occupa la nostra dimostrazione. Hilbert era interessato a quest'area per ragioni puramente astratte ma, come spesso accade, la sua matematica era esattamente quello che serviva per capire un problema che al tempo era fonte di perplessità per i fisici.

Se si riscalda una sostanza, a un certo punto i suoi atomi cominciano a emettere luce (da cui l'espressione «calor rosso»). La luce giallo-arancione dei lampioni al sodio è un buon esempio: gli atomi di sodio emettono luce prevalentemente a una lunghezza d'onda di 590 nanometri, nella parte gialla dello spettro visibile. Gli atomi assorbono o emettono luce quando gli elettroni al loro interno «saltano» da un livello di energia a un altro, e l'esatta frequenza di questa luce dipende dalla differenza (gap) di energia tra i livelli. Le frequenze della luce emessa dai materiali riscaldati ci forniscono quindi una «mappa» delle differenze tra i diversi livelli energetici dell'atomo. Spiegare queste emissioni atomiche è stato uno dei problemi con cui i fisici si confrontarono nella prima metà del XX secolo, e condusse direttamente allo sviluppo della meccanica quantistica; in tutto ciò, l'apparato matematico della teoria spettrale di Hilbert svolse un ruolo fondamentale.

Una di queste differenze tra livelli energetici quantistici è particolarmente importante. Il livello di energia più basso possibile di un materiale è il suo cosiddetto stato fondamentale; è il livello a cui si trova quando è privo di calore. Per portare un materiale al suo stato fondamentale è necessario raffreddarlo in laboratorio fino a temperature estremamente basse. A quel punto, perché il materiale possa fare alcunché di diverso dal rimanere nel suo stato fondamentale, qualcosa deve eccitarlo, portandolo a un'energia più alta. Il modo più semplice consiste nel fargli assorbire la più piccola quantità di energia possibile, il minimo per portarlo al livello di energia successivo sopra lo stato fondamentale: il primo stato eccitato. La differenza di energia fra lo stato fondamentale e questo primo stato eccitato è così importante che ha un nome a sé: gap spettrale.

In alcuni materiali c'è un grande divario tra lo stato fondamentale e il primo stato eccitato, mentre in altri i livelli di energia scendono fino allo stato fondamentale senza alcuna interruzione. A seconda che un materiale sia «munito di gap» o «privo di gap», ci sono profonde conseguenze sul suo comportamento alle basse temperature. Questa proprietà svolge un ruolo particolarmente significativo nelle transizioni di fase quantistiche.

Una transizione di fase avviene quando un materiale subisce un cambiamento improvviso e drastico nelle sue proprietà. A tutti noi sono familiari alcune transizioni di fase, come la trasformazione dell'acqua, quando è riscaldata, dalla sua forma solida, il ghiaccio, nella sua forma liquida. Ma ci sono transizioni di fase quantistiche più esotiche, che si verificano anche quando la temperatura è mantenuta estremamente bassa. Per esempio, modificare il campo magnetico attorno a un materiale o la pressione a cui è sottoposto può far sì che un isolante diventi un superconduttore o che un solido diventi un superfluido.

Come fa un materiale a subire una transizione di fase allo zero assoluto (–273,15 gradi Celsius), temperatura alla quale non c'è alcun calore che fornisca energia? Ecco che entra in gioco il gap spettrale. Quando esso scompare – quando un materiale è privo di gap – l'energia necessaria per raggiungere uno stato eccitato diventa nulla. La più minuscola quantità di energia sarà sufficiente a spingere il materiale attraverso una transizione di fase. Anzi, grazie ai bizzarri effetti quantistici che dominano la fisica a queste temperature infime, il materiale può temporaneamente «pren-

Illustrazione di Jen Christiansen

Illustrazione di Ben Gilliland

dere in prestito» questa energia dal nulla, passare attraverso una transizione di fase e «restituire» l'energia. Quindi, per capire le transizioni di fase quantistiche e le fasi quantistiche è necessario determinare quando i materiali sono dotati e quando sono privi di gap.

Poiché questo problema del gap spettrale è così fondamentale per la comprensione delle fasi quantistiche della materia, riaffiora dappertutto, in fisica teorica. Molti problemi aperti famosi e longevi nella fisica della materia condensata si riducono a risolvere questo problema per un materiale specifico. Una questione strettamente correlata emerge anche in fisica delle particelle: ci sono buoni motivi per ritenere che le equazioni fondamentali che descrivono i quark e le loro interazioni abbiano un «gap di massa». I dati sperimentali dai collisori di particelle come il Large Hadron Collider del CERN di Ginevra, nonché significativi risultati numerici con i supercomputer, sembrano sostenere questa idea, ma dimostrarla rigorosamente a partire dalla teoria risulta estremamente difficile. Tanto difficile, anzi, che questo problema, chiamato problema del gap di massa di Yang-Mills, è entrato a far parte dei sette problemi del Millennium Prize del Clay Mathematics Institute, e chiunque lo risolva ha diritto a un premio di un milione di dollari.

Tutti questi problemi sono casi particolari di quello generale sul gap spettrale. Abbiamo brutte notizie per chiunque stia cercando di risolverli, però. La nostra dimostrazione illustra che il problema generale è ancora più complicato di quanto si pensasse. E il perché ha a che fare con un problema chiamato, in tedesco, Entscheidungsproblem.

Domande senza risposta

Negli anni venti Hilbert volle dare ai fondamenti della matematica una base solida e rigorosa, un'impresa diventata nota come programma di Hilbert. Credeva che, di qualunque congettura matematica si possa formulare, sarebbe stato possibile in linea di principio dimostrare che è vera o che è falsa. (Si spera che di nessuna si riesca a dimostrare che è sia vera sia falsa, altrimenti c'è qualcosa di sbagliato nella matematica!) Questa idea potrebbe sembrare ovvia, ma in matematica bisogna affermare i concetti con assoluta certezza. Hilbert voleva una dimostrazione rigorosa.

Nel 1928 formulò l'Entscheidungsproblem. Anche se suona come uno starnuto in tedesco, significa «problema della decisione»: chiede se esista una procedura, cioè un algoritmo, che può decidere se una data affermazione matematica sia vera o falsa.

Per esempio, della frase «Moltiplicare qualsiasi numero intero per 2 dà un numero pari» si può facilmente dimostrare che è vera, usando logica elementare e aritmetica. Altre affermazioni sono più dubbie; per esempio: «Prendiamo un numero intero e compiamo la seguente operazione: se è pari lo dividiamo per 2; oppure

moltiplichiamo per 3 e aggiungiamo 1, se è dispari, poi ripetiamo il processo. Allora raggiungiamo sempre il numero 1». (Pensateci.)

Sfortunatamente per Hilbert, le sue speranze sarebbero state infrante. Nel 1931 Kurt Gödel pubblicò risultati notevoli oggi noti come teoremi di incompletezza: dimostrò che esistono enunciati matematici ragionevoli circa i numeri interi che non possono essere né dimostrati né confutati. In un certo senso, queste affermazioni sono al di fuori della portata della logica e dell'aritmetica. E Gödel dimostrò questo enunciato. Se trovate difficile farvene una ragione, siete in ottima compagnia: i teoremi di incompletezza di Gödel scossero profondamente le basi della matematica.

Ecco come farsi un'idea di quello che dimostrò Gödel: se qualcuno dice «Questa frase è una bugia», quella persona sta dicendo la verità o sta mentendo? Se sta dicendo la verità, vuol dire che l'affermazione deve essere una bugia. Se invece sta mentendo, l'affermazione è sincera. Questo dilemma è noto come paradosso del mentitore. Malgrado sembri una frase ragionevole, non c'è modo di stabilire se sia vera o falsa. Gödel riuscì a costruire una versione matematica rigorosa del paradosso, usando l'aritmetica di base.

Il successivo protagonista della storia dell'Entscheidungsproblem è il grande informatico britannico Alan Turing. Al grande pubblico è più famoso per il suo ruolo nella decrittazione del codice tedesco Enigma durante la seconda guerra mondiale, ma tra gli scienziati è conosciuto soprattutto per il suo articolo del 1937 *On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem*. Influenzato dal risultato di Gödel, il giovane Turing diede una risposta negativa all'Entscheidungsproblem di Hilbert dimostrando che non può esistere un algoritmo generale in grado di decidere se le affermazioni matematiche sono vere o false. (Anche il matematico statunitense Alonzo Church lo dimostrò indipendentemente prima di Turing, ma la dimostrazione di Turing è stata più significativa: spesso, in matematica, la dimostrazione di un risultato si rivela più importante del risultato stesso.)

Per risolvere l'Entscheidungsproblem, Turing dovette individuare con precisione che cosa significhi «calcolare» qualcosa. Oggi pensiamo ai computer come a dispositivi elettronici che abbiamo sulla scrivania o addirittura in tasca, ma i computer come li conosciamo oggi non esistevano nel 1936. Anzi, «computer» in origine significava una persona che eseguiva calcoli con carta e penna. D'altronde questo modo per fare i conti, come a scuola, non è matematicamente diverso dai calcoli svolti da un computer attuale: è solo molto più lento e può portare più facilmente a errori.

Turing concepì un computer ideale, che oggi chiamiamo macchina di Turing. Questo apparato ipotetico non somiglia a un computer moderno, ma può calcolare tutto ciò che può calcolare il più potente dispositivo attuale. In realtà qualsiasi problema che possa essere risolto con i calcoli (pure su computer quantistici o su macchine del XXXI secolo ancora da inventare) si può calcolare anche su una macchina di Turing; ci metterebbe solo molto più tempo.

Una macchina di Turing è composta da un nastro infinitamente lungo e da una «testina» in grado di leggere e scrivere un simbolo alla volta sul nastro, e poi di spostarsi di un passo verso destra o verso sinistra lungo il nastro stesso. L'*input* per il calcolo sono gli eventuali simboli scritti originariamente sul nastro, e l'*output* è tutto ciò che ci rimane scritto sopra quando la macchina di Turing smette di funzionare (si ferma). L'invenzione della macchina di Turing è stata più importante della soluzione dell'Entscheidungsproblem. Offrendo una formulazione precisa e matematicamente rigorosa di ciò che si intende per «svolgere un calcolo», Turing fondò l'informatica moderna.

Avendo costruito il suo immaginario modello matematico di computer, Turing proseguì dimostrando che esiste una domanda semplice circa le macchine di Turing che nessuna procedura matematica potrà decidere: una macchina in funzione su un dato input si fermerà prima o poi? La domanda è nota come problema della fermata. All'epoca, il risultato fu scioccante; nel frattempo i matematici si sono abituati al fatto che qualsiasi congettura su cui lavorano potrebbe essere dimostrabile, confutabile o indecidibile.

Dove entriamo in gioco noi

Nel nostro risultato abbiamo dovuto riunire tutti questi fili disparati. Volevamo mettere insieme meccanica quantistica del gap spettrale, informatica dell'indecidibilità e teoria spettrale di Hilbert per dimostrare che, come il problema della fermata, anche il problema del gap spettrale era uno di quelli indecidibili di cui abbiamo appreso da Gödel e Turing.

Chiacchierando a Seefeld nel 2012 ci venne un'idea su come dimostrare un risultato matematico più debole legato al gap spettrale. Giocherellammo con l'idea, senza nemmeno scarabocchiare su un tovagliolo, e sembrava che potesse funzionare, dopo di che iniziò la successiva sessione di seminari e la abbandonammo lì.

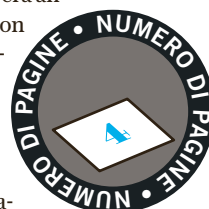
Mesi dopo uno di noi (Cubitt) andò a trovare Michael a Monaco e facemmo ciò che non avevamo fatto a Seefeld: annotammo qualche equazione su un pezzo di carta e ci convincemmo che l'idea funzionava. Nelle settimane seguenti completammo il ragionamento e lo scrivemmo in una nota di quattro pagine a uso interno. (In matematica nulla è veramente dimostrato fino a quando non lo si butta giù per iscritto o al computer per poi mostrarlo a un collega che gli dia un occhiata.) Concettualmente era un grande passo avanti. Prima, l'idea di dimostrare l'indecidibilità del gap spettrale era più uno scherzo che una prospettiva seria. Ora si intravedeva che potesse essere effettivamente possibile, ma c'era ancora molta strada da fare. La nostra idea iniziale non si poteva estendere fino a dimostrare l'indecidibilità del problema del gap spettrale vero e proprio.

NUMERO DI PAGINE • NUMERO DI PAGINE •

Il caffè di mezzanotte

Cercammo di compiere il passo successivo collegando il problema del gap spettrale all'informatica quantistica. Nel 1985 Richard Feynman, premio Nobel per la fisica, pubblicò uno degli articoli che lanciavano l'idea dei computer quantistici. Feynman mostrava come collegare gli stati fondamentali dei sistemi quantistici all'informatica. Il funzionamento di un computer è un processo dinamico: si fornisce al computer un input, che è sottoposto a diversi passaggi per calcolare un risultato e generare la risposta. Ma gli stati fondamentali dei sistemi quantistici sono statici: lo stato fondamentale è la configurazione in cui si trova un materiale quando è allo zero assoluto e non fa proprio niente. Quindi, come potrà svolgere un calcolo?

La risposta arriva da una delle proprietà che caratterizzano la meccanica quantistica: la sovrapposizione, che è la capacità degli oggetti di trovarsi in più stati simultaneamente, come per esempio il gatto quantistico di Schrödinger, che può essere vivo e morto allo stesso tempo. Feynman propose di costruire uno stato quantico dato da una sovrapposizione delle fasi di un calcolo: l'input iniziale, ogni fase intermedia del calcolo e l'output finale, tutti simultaneamente. Alexei Kitaev, del California Institute of Technology, ha poi sviluppato questa idea, costruendo un materiale quantistico immaginario il cui stato fondamentale è fatto così.

Se usassimo la costruzione di Kitaev per mettere l'intera storia

di una macchina di Turing in sovrapposizione nello stato fondamentale del materiale, potremmo trasformare il problema della fermata nel problema del gap spettrale? In altre parole, potremmo dimostrare che qualsiasi metodo per risolvere il problema del gap spettrale risolverebbe anche il problema della fermata? Poiché Turing ha già dimostrato che quest'ultimo è indecidibile, ne risulterebbe dimostrato anche che il problema del gap spettrale deve essere indecidibile.

Codificare il problema della fermata in uno stato quantico non era un'idea nuova. Seth Lloyd, del Massachusetts Institute of Technology, l'aveva proposto quasi vent'anni prima per mostrare l'indecidibilità di un altro problema quantistico. Daniel Gottesman, del Perimeter Institute for Theoretical Physics a Waterloo, e Sandy Irani, dell'Università della California a Irvine, avevano usato l'idea di Kitaev per dimostrare che anche singole file di particelle quantistiche interagenti possono mostrare un comportamento molto complesso. Anzi, quella che speravamo di usare era proprio la versione di Gottesman e Irani della costruzione di Kitaev.

Ma il gap spettrale è un problema diverso, e ci siamo ritrovati ad affrontare ostacoli matematici apparentemente insormontabili. Il primo aveva a che fare con il modo di fornire l'input alla macchina di Turing. Ricordate che l'indecidibilità del problema della fermata riguarda l'arresto o meno della macchina di Turing su un dato input. Come possiamo progettare il nostro materiale quantistico immaginario in un modo che ci permetta di scegliere l'input della macchina di Turing da codificare nello stato fondamentale?

Quando lavoravamo sul problema precedente (quello del caffè di Seefeld), avevamo avuto un'idea su come affrontare la questione inserendo una «torsione» nelle interazioni tra le particelle e usando l'angolo di questa rotazione per creare un input per la macchina di Turing. Nel gennaio 2013 ci siamo incontrati a un convegno a Pechino e abbiamo discusso insieme di questo progetto, ma ci siamo subito resi conto che ciò che dovevamo dimostrare andava molto vicino a contraddire i risultati noti sulle macchine di Turing quantistiche. Abbiamo deciso che ci serviva una dimostrazione completa e rigorosa della validità della nostra idea, prima di proseguire con il progetto.

A quel punto Toby faceva parte del gruppo di David Pérez-García all'Universidad Complutense di Madrid da più di due anni. Quello stesso mese si trasferì all'Università di Cambridge, ma il suo nuovo appartamento non era pronto, così il suo amico Ashley Montanaro, anche lui teorico dell'informazione quantistica, si offrì di ospitarlo. In quei due mesi Toby lavorò per produrre una dimostrazione rigorosa di questa idea. Il coinquilino lo trovava la mattina al tavolo della cucina, con accanto una fila di tazze di caffè vuote, sul punto di andare a letto dopo aver lavorato la notte per capire i dettagli e metterli per iscritto. Alla fine di quei due mesi, Toby mandò in giro la dimostrazione completata.

Alla ricerca della piastrella perduta

Numero di pagine 29

Questa dimostrazione di 29 pagine mostrava come superare uno degli ostacoli per collegare lo stato fondamentale di un materiale quantistico all'elaborazione con una macchina di Turing. Ma c'era un altro ostacolo ancora più grande: il materiale quantistico risultante era sempre privo di gap. Se lo è sempre, la soluzione del problema del gap spettrale per questo particolare materiale è banale: la risposta è «privo di gap»!

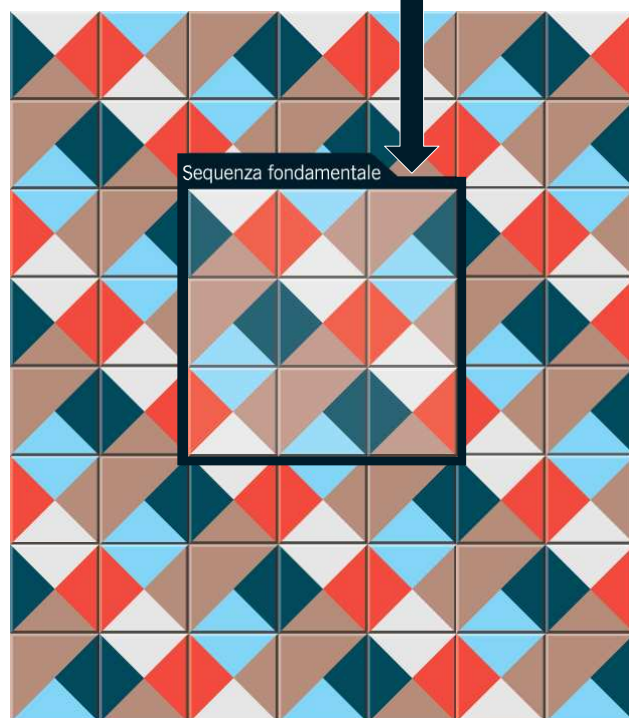
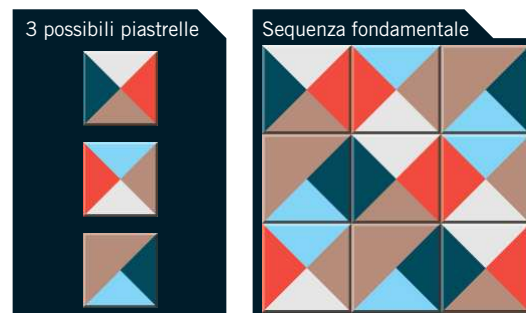
La nostra idea risalente a Seefeld (che si era rivelata un risultato molto più debole di quanto sperassimo) servì a superare l'osta-

SOLUZIONE

Tassellazione di un pavimento infinito

Per collegare il problema del gap spettrale al problema della fermata, gli autori hanno considerato la classica questione matematica su come piastrellare un pavimento infinitamente grande. Immaginiamo di avere una scatola con una certa scelta di piastrelle, e di volerle sistemare in modo che i colori su ogni lato di ogni piastrella corrispondano a quelli delle piastrelle adiacenti. In alcuni casi è possibile ricoprendo il pavimento in uno schema ripetitivo «periodico» o in uno «aperiodico», di tipo frattale.

Piastrelle periodiche

Una versione del problema classico riguarda piastrelle di tre tipi e contenenti complessivamente cinque colori diversi. In questo caso particolare è possibile ricoprire il pavimento facendo in modo che i lati in contatto abbiano lo stesso colore, creando un rettangolo che si ripete. Sui lati opposti del rettangolo i colori combaciano, e quindi molte versioni dello stesso rettangolo si possono mettere una vicina all'altra in uno schema infinito.

Piastrelle aperiodiche

Nella loro dimostrazione gli autori hanno usato un particolare insieme di piastrelle ideato dal matematico Rafael Robinson nel 1971. Le piastrelle di Robinson combaciano tra loro in una sequenza che si espande sempre più, senza ripetersi, ma creando invece uno schema di tipo frattale. Sono permesse tutte le rotazioni delle sei piastrelle mostrate qui. Ci sono anche modi per assemblare questi pezzi in uno schema periodico, ma aggiungendo ulteriori segni alle piastrelle (*non mostrati*) Robinson ha messo a punto un insieme di 56 piastrelle per le quali non è possibile alcuna disposizione diversa da quella mostrata.

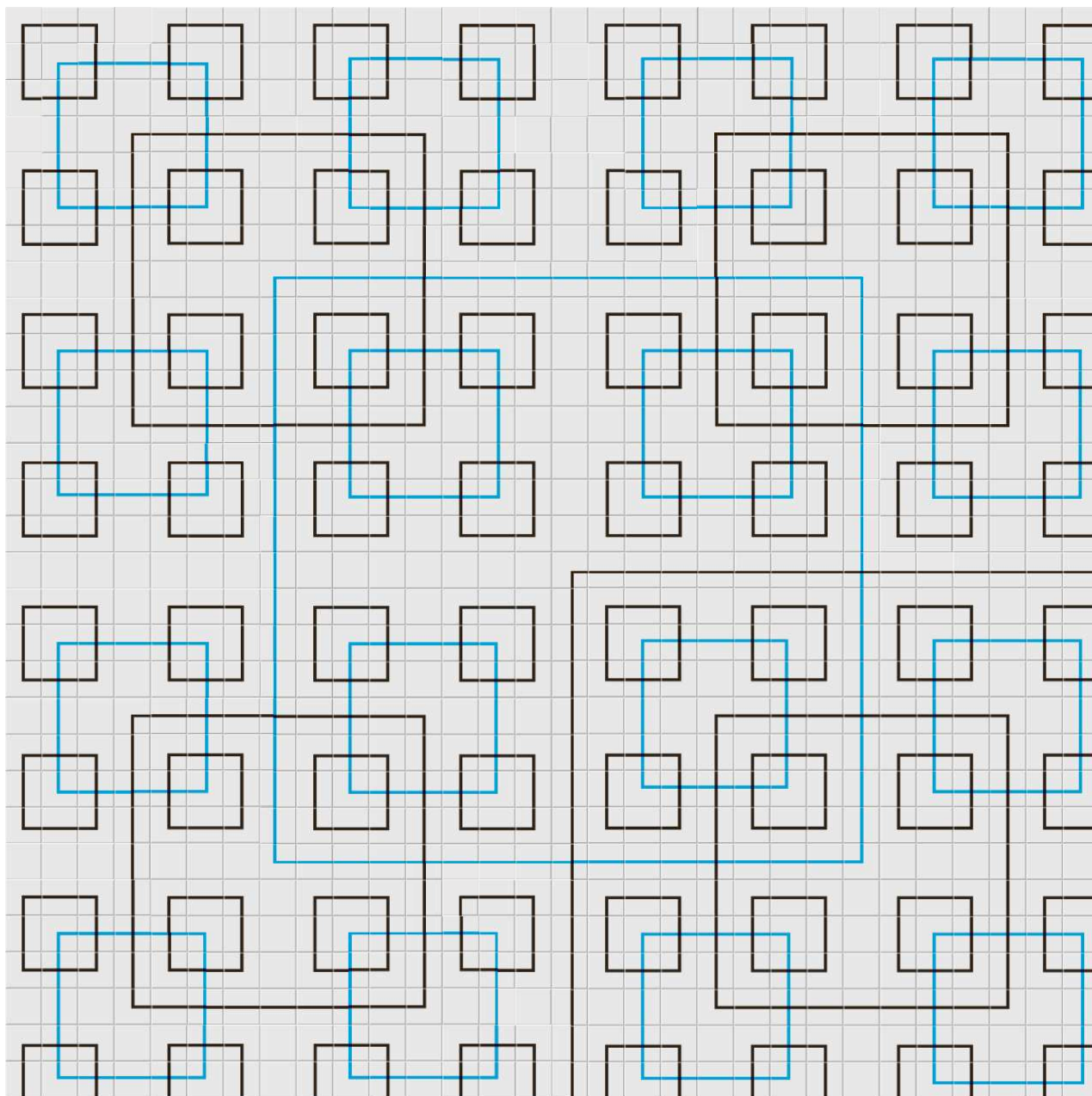



Illustrazione di Jen Christiansen

colo. La chiave stava nell'usare le «tassellazioni». Immaginiamo di trovarci a coprire di piastrelle il pavimento di un grande bagno, anzi supponiamo che sia un bagno di estensione infinita. Sulle piastrelle è tracciato un motivo semplice: ciascuno dei quattro lati di ognuna è di un colore diverso. Abbiamo a disposizione diverse scatole di piastrelle, ognuna con una diversa disposizione di colori, e immaginiamo di avere un numero infinito di piastrelle in ogni scatola. Vogliamo coprire il pavimento del bagno infinito in modo che i colori sulle piastrelle adiacenti corrispondano. È possibile?

La risposta dipende da quali scatole di piastrelle abbiamo a disposizione. Con alcuni insiemi di colorazioni riusciremo a completare il pavimento del bagno infinito, con altre no. Prima di scegliere quali scatole di piastrelle comprare, vorremmo sapere se funzioneranno o no, ma sfortunatamente nel 1966 il matematico Robert Berger dimostrò che questo problema è indecidibile.

Un modo semplice per ottenere una tassellazione del pavimento del bagno infinito sarebbe formare con le piastrelle un piccolo rettangolo i cui colori sui lati opposti si corrispondano. Poi potremmo coprire l'intero piano ripetendo questo schema rettangolare. Dato che si ripetono ogni poche tessere, questi schemi sono detti periodici. Il motivo per cui il problema della tassellazione è indecidibile è che esistono anche tassellazioni non periodiche: disposizioni che coprono il pavimento infinito ma non si ripetono mai.

All'epoca in cui stavamo discutendo del nostro primo, piccolo risultato, avevamo studiato una semplificazione del 1971 della dimostrazione originale di Berger, dovuta a Rafael Robinson, dell'Università della California a Berkeley. Robinson ha costruito una serie di 56 scatole diverse di piastrelle che, se usate per ricoprire il pavimento, producono un disegno composto da quadrati sempre più grandi che si intersecano. Questo disegno frattale sembra periodico, ma in realtà non si ripete mai precisamente. Abbiamo discusso a lungo della possibilità di usare i risultati sulle tassellazioni per dimostrare l'indecidibilità delle proprietà quantistiche, ma allora non pensavamo neppure al gap spettrale. L'idea era in letargo.

Nell'aprile 2013 Toby andò a trovare Charlie Bennett al Thomas J. Watson Research Center dell'IBM. Tra i numerosi risultati di Bennett, prima di diventare uno dei padri fondatori della teoria dell'informazione quantistica, c'era stato il suo fondamentale lavoro degli anni settanta sulle macchine di Turing. Volevamo la sua opinione su aspetti tecnici della nostra dimostrazione per sincerarci di non trascurare qualcosa. Ci disse che non pensava a questi argomenti da 40 anni, ed era ora che gli subentrasse una generazione più giovane. (Dopo di che ci spiegò con molta disponibilità sottili dettagli matematici del suo lavoro degli anni settanta, che ci rassicurarono che la nostra dimostrazione andava bene.)

Bennett ha un immenso bagaglio di conoscenze scientifiche; dato che avevamo parlato di macchine di Turing e di indecidibilità, ci inviò per posta elettronica copie di un paio di vecchi articoli sull'indecidibilità che pensava potessero interessarci. Uno era lo stesso articolo del 1971 di Robinson che avevamo già studiato, ma adesso era il momento giusto per far venire alla luce le idee seminate nelle nostre precedenti discussioni. Rileggendo l'articolo di Robinson ci siamo resi conto che era quello che ci serviva per impedire che il gap spettrale sparisse.

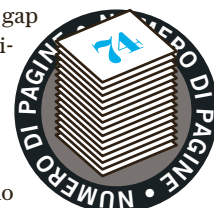
La nostra idea iniziale era codificare una copia della macchina di Turing all'interno dello stato fondamentale. Progettando con cura le interazioni tra particelle potevamo far sì che l'energia dello stato fondamentale si innalzasse un poco se la macchina di Turing si fermava. Il gap spettrale – la differenza di energia fino al primo stato eccitato – sarebbe quindi dipeso dalla fermata o meno della macchina di Turing. Questa idea aveva solo un problema, ma era bello grosso. All'aumentare del numero di particelle, il contributo aggiuntivo all'energia dello stato fondamentale si avvicinava sempre più a zero, portando a un materiale sempre privo di gap.

Adattando la costruzione della tassellazione di Berger, potevamo però codificare nello stato fondamentale molte copie della stessa identica macchina di Turing. Potevamo addirittura associarne una copia a ogni quadrato nella tassellazione di Robinson. Dato che si tratta di copie identiche della stessa macchina di Turing, se una si ferma si fermano tutte. Ora, tutti i loro contributi energetici si sommano. Via via che il numero di particelle aumenta, aumenta anche il numero di quadrati nella tassellazione, e quindi il numero di copie della macchina di Turing, cosicché il loro contributo energetico diventa enorme, dandoci la possibilità di un gap spettrale.

Esami e scadenze

Nel risultato che avevamo dimostrato rimaneva un problema significativo: non eravamo in grado di dire nulla su quanto fosse grande il gap energetico, quando era presente nel materiale. Questa incertezza lasciava il nostro risultato aperto all'obiezione che il gap potesse essere tanto piccolo che di fatto non esisteva. Dovevamo dimostrare che, quando esisteva, era effettivamente grande, e la prima soluzione che abbiamo trovato veniva dal considerare materiali in tre dimensioni al posto di quelli planari a cui avevamo pensato fino ad allora.

Quando si pensa ininterrottamente a un problema matematico si fanno progressi nei momenti più inaspettati. David ha lavorato, a mente, sui dettagli dell'idea mentre supervisionava un esame. Camminando per l'aula lungo le file dei banchi, era ignaro degli studenti che gli lavoravano febbrilmente intorno. Una volta finito l'esame ha messo per iscritto questa parte della dimostrazione.

Sapevamo che si poteva ottenere un grande gap spettrale. Lo si poteva ottenere anche in due dimensioni o ne erano necessarie tre? Torniamo al problema della piastrellatura di un pavimento infinito. Dovevamo dimostrare che per la tassellatura di Robinson, se anche si sbagliava una piastrella da qualche parte, ma i colori combaciavano in tutto il resto, la struttura veniva meno solo in una piccola regione centrata attorno alla piastrella sbagliata. Se fossimo riusciti a dimostrare questa «robustezza» della tassellatura di Robinson, ne sarebbe seguito che non c'era rischio di ottenere un gap spettrale piccolo modificando di poco la tassellatura.

A fine estate 2013 ritenevamo di avere tutti gli ingredienti affinché la nostra dimostrazione funzionasse. C'erano però ancora alcuni importanti dettagli da risolvere, come verificare che la robustezza della tassellatura si poteva unire a tutti gli altri ingredienti della dimostrazione per dare il risultato completo. L'Isaac Newton Institute for Mathematical Science di Cambridge ha ospitato un seminario speciale di informazione quantistica per il semestre autunnale 2013, a cui eravamo stati invitati tutti e tre. Era l'occasione perfetta per lavorare insieme e completare il progetto. David però non poteva rimanere a Cambridge a lungo; eravamo determinati a completare la dimostrazione prima che se ne andasse.

L'Isaac Newton Institute ha lavagne ovunque, persino nei bagni! Per le nostre discussioni ne abbiamo scelta una in un corridoio (la più vicina alla macchina del caffè). Abbiamo trascorso ore e ore alla lavagna a sviluppare le idee mancanti, e poi ci siamo divisi

il compito di rendere queste idee matematicamente rigorose. Questo processo richiede sempre più tempo e impegno di quanto possa sembrare alla lavagna. Mentre incombeva la data della partenza di David, abbiamo lavorato ininterrottamente per tutto il giorno e buona parte della notte. Appena poche ore prima che partisse, avevamo finalmente una dimostrazione completa.

In fisica e in matematica i ricercatori rendono pubblica la maggior parte dei loro risultati facendo apparire una bozza dei loro articoli sul server per *preprint* arXiv.org, prima di inviarli a una rivista che li sottoporrà a peer review. Sebbene a quel punto avessimo una certa fiducia nel nostro ragionamento e ci fossimo lasciati alle spalle la parte più difficile, la nostra dimostrazione non era pronta per essere pubblicata. C'erano molti dettagli matematici da completare, e inoltre volevamo riscrivere e riordinare il tutto (speravamo, così facendo, di ridurre il numero di pagine, ma in questo avremmo fallito completamente). La cosa più importante era che, anche se almeno uno di noi aveva controllato ogni parte della dimostrazione, nessuno aveva rivisto tutto dall'inizio alla fine.

Nell'estate 2014 David stava passando un anno sabbatico al Politecnico di Monaco di Baviera con Michael, e Toby li raggiunse. Il piano era trascorrere questo tempo a controllare e completare l'intera dimostrazione, riga per riga. David e Toby avevano lo studio insieme; ogni mattina David arrivava con una nuova stampata della bozza dell'articolo, con una gran quantità di appunti e domande scritti sui margini e su foglietti inseriti. Tutti e tre ci portavamo il caffè in studio e riprendevamo da dove eravamo rimasti il giorno prima, discutendo alla lavagna la sezione successiva della dimostrazione. Nel pomeriggio ci dividevamo il lavoro di riscrittura dell'articolo, di aggiunta del nuovo materiale e di analisi della sezione successiva della dimostrazione. Toby soffriva di ernia del disco e non riusciva a stare seduto, così lavorava tenendo il portatile appoggiato su un bidone della spazzatura ribaltato e posato sulla scrivania. David gli stava seduto di fronte, con la pila crescente di stampate e appunti che occupava una parte sempre più vasta della scrivania. In un paio di occasioni abbiamo trovato lacune significative nella dimostrazione. I problemi si sono rivelati superabili, ma così si aggiungeva ulteriore materiale. Il numero di pagine continuava a crescere.

Dopo sei settimane avevamo controllato, completato e migliorato ogni singola riga della dimostrazione. Ci sarebbero voluti altri sei mesi per finire di scrivere tutto. Finalmente, a febbraio 2015, abbiamo caricato il documento su arXiv.org.

Che cosa significa il tutto

In definitiva, che cosa dicono queste 146 pagine di matematica complicata?

Innanzitutto, l'aspetto più importante è che danno una rigorosa dimostrazione matematica del fatto che una delle domande di base della fisica quantistica non si può risolvere in generale. Si noti che qui «in generale» è fondamentale. Anche se il problema della fermata è in genere indecidibile, è spesso possibile, per specifici input di una macchina di Turing, dire se si fermerà o meno. Per esempio, se la prima istruzione dell'input è «fermati», la risposta è abbastanza chiara. Lo stesso vale se la prima istruzione dice alla macchina di Turing di proseguire per sempre un certo ciclo. Quindi, sebbene l'indecidibilità implichi che il problema del gap spettrale non si può risolvere per tutti i materiali, è possibile risolverlo per materiali specifici. Di fatto, la fisica della materia condensata è disseminata di esempi del genere. Eppure il nostro risultato dimostra rigorosamente che persino una descrizione perfetta e completa delle interazioni microscopiche tra le particelle di un materiale non è sempre sufficiente per dedurne le proprietà macroscopiche.

Forse vi starete chiedendo se questa scoperta abbia qualche implicazione per la «vera fisica». Dopotutto è sempre possibile provare a misurare sperimentalmente il gap spettrale. Immaginate di poter realizzare concretamente il materiale quantistico dalla nostra dimostrazione matematica e di produrne un pezzo in laboratorio. In realtà le sue interazioni sono così complicate che riuscirci è molto oltre qualsiasi cosa gli scienziati possano fare. Ma ammettiamo di riuscirci, e poi di prendere un pezzo di questo materiale e cercare di misurarne il gap spettrale: il materiale non potrebbe fare spallucce e dire: «Non posso dirvelo: è indecidibile». L'esperimento dovrebbe dare qualcosa come risultato della misurazione.

La risposta a questo apparente paradosso sta nel fatto che, a rigore, i termini «con gap» e «senza gap» hanno un senso matematico solo quando il pezzo di materiale è infinitamente grande. Ora, i 10^{23} atomi (o giù di lì) contenuti anche in un piccolo pezzo di materiale rappresentano senz'altro un numero molto grande. Per i materiali normali è sufficientemente vicino all'infinito da non fare alcuna differenza, ma per lo strano materiale costruito nella nostra dimostrazione, «grande» non è equivalente a «infinito». Può darsi che, con 10^{23} atomi, negli esperimenti il materiale appaia privo di gap. Per sicurezza prendiamo allora un campione di materiale di dimensioni doppie e misuriamo nuovamente: ancora senza gap. Poi, a tarda notte, un dottorando arriva in laboratorio e aggiunge un singolo atomo. La mattina dopo, quando misuriamo di nuovo, il materiale è diventato munito di gap! Il nostro risultato dimostra che la quantità di materiale a cui può verificarsi questa transizione è incalcolabile (proprio nel senso di Gödel-Turing che ora ci è familiare). Questa storia, per ora, è ipotetica, perché non è possibile realizzare un materiale così complesso. Ma mostra, con dietro una rigorosa dimostrazione matematica, che è necessario prestare particolare attenzione quando si estrapola dai risultati sperimentali per dedurre il comportamento di una quantità maggiore di uno stesso materiale.

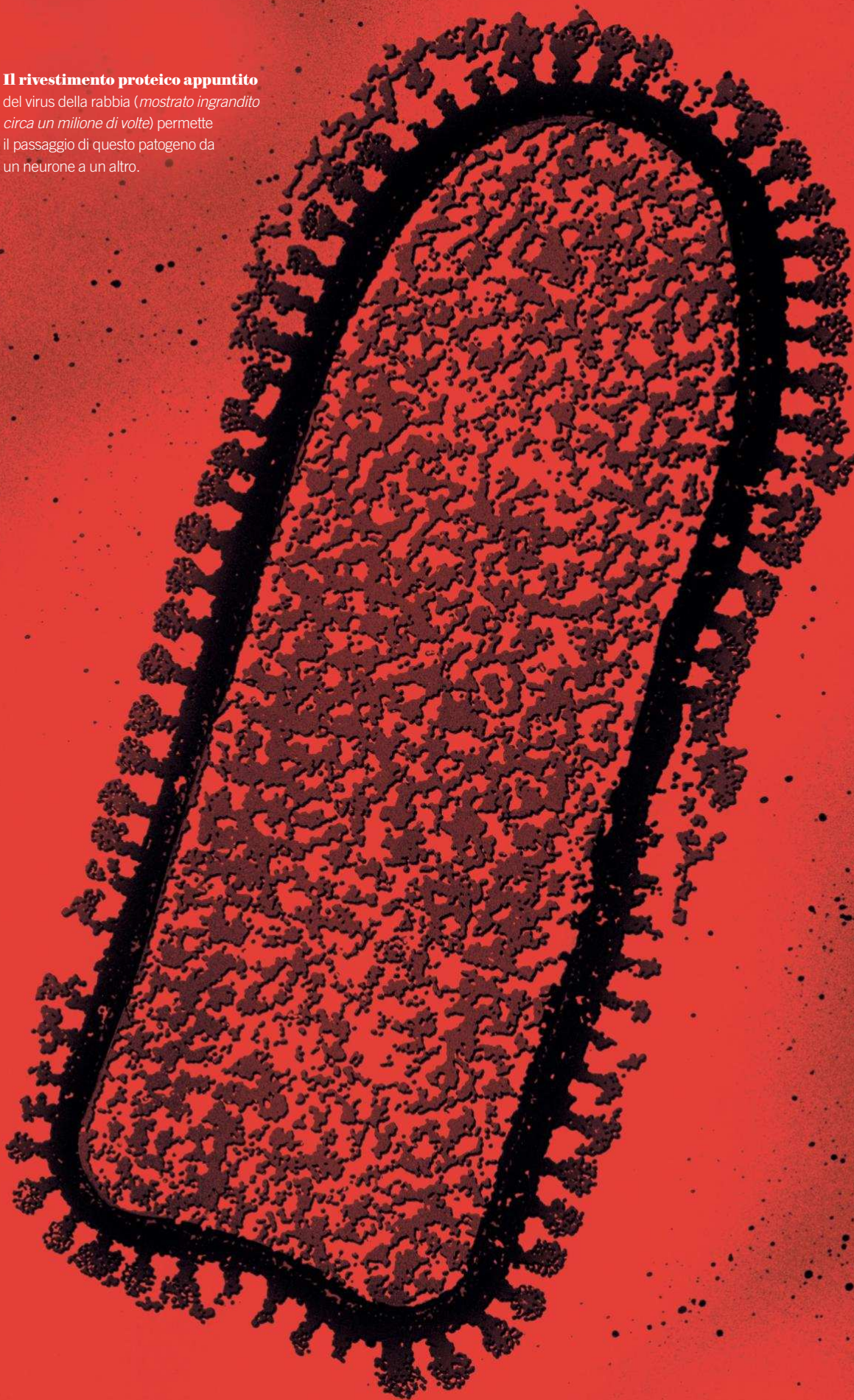
E ora torniamo al problema di Yang-Mills: se le equazioni che descrivono i quark e le loro interazioni abbiano un gap di massa. Le simulazioni al computer indicano che la risposta è positiva, ma il nostro risultato suggerisce che determinarlo per certo possa essere un altro paio di maniche. È possibile che i dati ottenuti dalle simulazioni al computer per il gap di massa di Yang-Mills possano svanire se la simulazione fosse appena più grande? Il nostro risultato non può dirlo, ma apre la porta alla stimolante possibilità che il problema di Yang-Mills, e altri problemi importanti per i fisici, possano essere indecidibili.

Ma che ne è di quel risultato da cui siamo partiti, piccolo e non molto significativo, che cercavamo di dimostrare anni fa in un caffè nelle Alpi austriache? In realtà, ci stiamo ancora lavorando su. ■

PER APPROFONDIRE

Undecidability and Nonperiodicity for Tilings of the Plane. Robinson R.M., in «Inventiones Mathematicae», Vol. 12, n. 3, pp. 177-209, settembre 1971.

Undecidability of the Spectral Gap. Cubitt T.S., Pérez-García D. e Wolf M.M., in «Nature», Vol. 528, pp. 207-211, 10 dicembre 2015. Preprint disponibile all'indirizzo: **https://arxiv.org/abs/1502.04573.**

Il rivestimento proteico appuntito del virus della rabbia (*mostrato ingrandito circa un milione di volte*) permette il passaggio di questo patogeno da un neurone a un altro.

NEUROSCIENZE

La rabbia nel cervello

Usando forme geneticamente modificate del virus della rabbia, i neuroscienziati riescono a ottenere una mappa dei circuiti cerebrali con una precisione senza precedenti

di Andrew J. Murray

Andrew J. Murray è neuroscienziato al Sainsbury Wellcome Center for Neural Circuits and Behavior, a Londra. Il suo gruppo di ricerca studia come i circuiti cerebrali generano il movimento.

In una notte al chiaro di luna, tre compagnoni a cavallo nella brughiera inglese rimasero pietrificati da un'immagine orribile: «La visione paurosa di una creatura ributtante, di un'immane bestia nera, in forma di mastino, e tuttavia più grande di qualsiasi cane su cui occhio mortale si sia mai posato, che stava sopra il cadavere di Hugo e gli sbranava la gola. E pur mentre quei tre guardavano il mostro seguitò a dilaniare la gola di Hugo Baskerville, ma non appena esso ebbe rivolti su di loro gli occhi fiammeggianti e le sbavanti mandibole, i tre lanciarono un urlo di terrore e, sempre urlando, fuggirono attraverso la landa».

Gli storici della medicina hanno rintracciato il terrore che *Il mastino dei Baskerville* evocò tra gli appassionati di Arthur Conan Doyle nell'impatto della rabbia sulla coscienza dei suoi contemporanei britannici. Con la sua capacità di trasformare il più placido dei nostri animali da compagnia in una bestia schiumante e violenta, e con un tasso di mortalità che sfiora il 100 per cento, il virus della rabbia è stato uno dei flagelli più temuti della storia umana.

Già nel 1804 gli esperimenti del medico tedesco Georg Gottfried Zinke indicavano che il virus si trova in concentrazioni elevate nella saliva di un animale infettato. Questo germe agisce anche incrementando la produzione di saliva, aumentandone quindi la quantità. Ecco perché i cani rabbiosi sbavano. Pasteur fece un passo avanti quando, negli anni ottanta dell'Ottocento, dimostrò che anche il cervello è infestato dal virus. Nulla di ciò è frutto del caso. Due secoli di ricerche hanno finalmente stabilito che il virus della rabbia combina una propensione a essere trasferito dalle mascelle zuppe di saliva di un animale infettato alla capacità diabolica di trasformarlo in una furia che aggredisce a morsi. Con un trucco dell'evoluzione, il virus manipola il cervello dell'ospite per garantirsi una trasmissione efficiente.

Oggi la rabbia uccide più di 59.000 persone ogni anno. Ma, grazie alle vaccinazioni e alla quarantena degli animali infettati, non suscita più terrore nei paesi sviluppati. Anzi, i neuroscienziati stanno trasformando questo germe maligno a vantaggio del genere umano. Il virus della rabbia è abile a farsi strada dalla sede del morso fino al cervello saltando furtivamente di neurone in neurone, sfuggendo così alla rilevazione del sistema immunitario. Il mio gruppo al Sainsbury Wellcome Center for Neural Circuits and Behavior, a Londra, e altri hanno sfruttato e perfezionato questa capacità, per visualizzare le connessioni tra neuroni.

Il cervello umano è costituito da miliardi di neuroni, ciascuno collegato a migliaia di altri; creare la mappa di questa intricata rete di fili è essenziale per capire come genera sentimenti e comportamenti. Usando varietà geneticamente modificate del virus della rabbia possiamo osservare quale genere di segnale riceve un particolare tipo di neurone, come i segnali elettrici viaggiano dall'occhio al cervello, e quali tipi di neuroni controllano la postura per impedirci di cadere. Questo settore è agli esordi, ma informazioni del genere potrebbero aiutarci a capire, e forse a trovare i rimedi per malattie neurologiche come il Parkinson.

Dal morso al cervello

All'inizio il morso inietta virioni, o particelle virali, nel tessuto muscolare. Capsula a forma di proiettile contenente un filamento di RNA e proteine, il virione della rabbia è rivestito da una proteina appuntita, una glicoproteina. Il rivestimento induce con un trucco i motoneuroni della sede dell'aggressione a far accedere il virus. I motoneuroni emettono sostanze che fanno contrarre i muscoli, e sono situati alla fine di una catena di altri neuroni collegati al cervello della vittima, la destinazione ultima del virus.

Per essere precisi, la glicoproteina si lega a un recettore su una terminazione sinaptica: un punto dove un neurone trasmette segnali a quello adiacente. Come una porta da cui si può solo uscire da un'area di sicurezza, ma non entrare, la terminazione sinaptica sorveglia un passaggio a senso unico, una sinapsi, tra i neuroni. Per convenzione, la direzione «verso valle» della sinapsi è il flusso di segnali da un neurone al successivo, sul tragitto dal cervello ai muscoli. Il virus della rabbia scorre invece «controcorrente», perché deve raggiungere il cervello. Così inganna il recettore, che lo lascia entrare in un motoneurone dalla porta di uscita.

I virus sono abili nell'usare le cellule del loro ospite per i propri fini, ma pochi battono i virus della rabbia in questo compito. Una volta all'interno, l'intruso si sbarazza del travestimento glicoproteico, e il suo RNA comincia a lavorare, usando materiali e metabolismo della cellula per produrre copie di se stesso e di tutte le sue proteine caratteristiche. Poi queste componenti si riassemblano per creare i virioni figli. Se da un lato molte specie di virus si replicano così rapidamente da costringere la cellula infettata a esplodere, liberando i virioni nello spazio tra le cellule, dall'altro il virus della rabbia regola la sua riproduzione, generando un numero di virioni figli sufficienti per continuare a procedere. In questo modo evita di causare danni che allertino il sistema immunitario; lascia intatta la cellula ospite e attraversa una sinapsi, verso un nuovo neurone a monte. Questa sua furtività fa sì che la malattia abbia un periodo di incubazione lungo, senza sintomi, che nell'essere umano dura in genere da uno a tre mesi.

Appena transitato in un nuovo neurone, il virione ricomincia il processo: spogliandosi, copiando se stesso e riassemblando vi-

IN BREVE

Il virus della rabbia è adattato per saltare da un neurone all'altro mentre si fa strada dalla sede di un morso al cervello dell'animale.

Gli scienziati hanno sfruttato questa capacità per identificare i neuroni che inviano segnali ai neuroni particolari che studiano.

La tecnologia modifica il virus affinché emani un bagliore, infetti solo i neuroni che interessano e salti una volta sola in una connessione.

Chris Bjornberg Science Source (*pagine precedenti*)

rioni figli che si spostano verso il prossimo neurone a monte. Così il virus sceglie un percorso lungo il sistema nervoso, avanzando lentamente dal motoneurone incontrato per primo nel tessuto muscolare, attraverso il midollo spinale, fino al cervello.

All'inizio del secolo alcuni gruppi di ricerca, come quelli di Gabriella Ugolini, oggi al Paris-Saclay Institute of Neuroscience, e di Peter Strick, oggi all'Università di Pittsburgh, hanno tentato di usare il virus della rabbia come tracciante dei circuiti neuronali. Ma era problematico decifrare la strada che il virus seguiva dal muscolo al cervello. Se si osserva un'immagine di neuroni infettati dal virus, come distinguere il primo balzo dell'invasore da un neurone al successivo, dal secondo balzo, e così via?

Inizialmente i ricercatori hanno risolto il problema eseguendo l'eutanasia sugli animali da laboratorio poco dopo l'infezione, permettendo così al virus di diffondersi in una o due sinapsi appena. Questo metodo ha permesso di farsi un'idea delle vie principali nel cervello che contribuiscono al controllo motorio, però ha alcuni svantaggi. Non tutte le connessioni tra i neuroni sono equivalenti. Una sinapsi potrebbe essere forte (o debole), aumentando (o diminuendo) la probabilità che un segnale che l'attraversa indurrà il neurone bersaglio a scaricare come risposta. Un'altra sinapsi invece potrebbe essere vicina al corpo cellulare, o distante, dove termina la proiezione. Alcuni neuroni formano un solo collegamento con un neurone a valle; altri invece ne formano centinaia. Questa eterogeneità implica che il virus impiega tempi variabili per viaggiare da un neurone al successivo, aggiungendo un livello di incertezza. E se il virus attraversasse due o tre sinapsi forti prima di attraversarne una debole?

All'inizio del secolo alcuni gruppi di ricerca hanno provato a usare il virus della rabbia come tracciante

Ingegneria virale

Per aggirare questo problema gli scienziati dovevano manipolare il virus della rabbia. Da tempo i biologi molecolari hanno sviluppato la capacità di manipolare il DNA: scambiare geni è ormai routine, come preparare il caffè in laboratorio. Il virus della rabbia originario non ha però DNA da manipolare, ma solo RNA. L'avvento della genetica inversa, che ribalta il normale ciclo genetico generando RNA dal DNA, ha aggirato l'ostacolo. Nel 1994 Matthias Schnell e Karl-Klaus Conzelmann, allora entrambi al Federal Research Center for Virus Diseases of Animals, a Tubinga, in Germania, hanno prodotto un virus della rabbia funzionante, solo da DNA clonato. Hanno addirittura alterato il genoma del virus: il filamento di RNA che codifica le sue proprietà caratteristiche.

La capacità di manipolare i geni ha permesso di capire meglio come i geni del virus della rabbia contribuiscono alle sue capacità. Si è scoperto che per spostarsi tra i neuroni è essenziale un solo gene: quello che codifica per la glicoproteina. Un virus della rabbia a cui fosse rimosso il gene per la glicoproteina può infettare una cellula, ma una volta all'interno rimane lì. La scoperta ha introdotto il virus nella corrente principale delle neuroscienze.

Nel 2007 la collaborazione tra i neuroscienziati Ian Wickersham ed Edward Callaway, del Salk Institute for Biological Studies a La Jolla, in California, e il virologo Conzelmann e Stefan Finke, del Friedrich-Loeffler-Institut, in Germania, ha prodotto un sistema ingegnoso per costruire la mappa dei circuiti neuronali. Il loro primo passo è stato scambiare il gene per la glicoproteina con un gene che codificava per una proteina fluorescente. Il virione geneticamente modificato non produceva più glicoproteine; il suo RNA produceva invece copie della proteina fluorescente (insieme con le altre proteine del virus). Quindi la cellula infettata brillava di un colore scelto dagli scienziati.

Il secondo passo è stato fornire al neurone bersaglio la glicoproteina con qualche altro meccanismo genetico. In quel modo i virioni figli potevano rivestirsi della glicoproteina e saltare una volta sola, non di più. A questo scopo, gli scienziati hanno usato un virus molto semplice, il cosiddetto virus adeno-associato (AAV), perché spesso è associato a virus molto più grandi, gli adenovirus. Gli AAV hanno una quantità esigua di DNA. I ricercatori hanno inserito in quel DNA un gene per la glicoproteina del virus della rabbia. Il virione della rabbia ha potuto usare la glicoproteina prodotta dal gene per attraversare una singola sinapsi. Ma non poteva prendere con sé il gene della glicoproteina perché era un segmento di DNA, non di RNA. Così, una volta saltato nella cellula successiva, il virione era di nuovo bloccato. A quel punto uno sguardo al cervello dell'animale infettato rivelava nel sistema nervoso popolazioni di cellule brillanti, direttamente collegate a qualsiasi neurone i ricercatori volessero indagare.

Ma rimaneva un problema. L'iniezione del virus della rabbia nel cervello si risolveva nell'infezione diretta di qualsiasi neurone con una proiezione nella sede di iniezione. Senza un modo per limitare l'infezione iniziale del virus a particolari neuroni, gli scienziati non potevano distinguere i neuroni infettati direttamente dal virus iniettato da quelli infettati dopo che il virus aveva attraversato una sinapsi. La soluzione sarebbe venuta da un altro campo della virologia: virus che colpiscono in modo specifico gli uccelli.

In natura ci sono classi di virus che infettano solo gruppi specifici di animali. Per esempio il virus della leucosi aviaria (ASLV), che causa il tumore nei polli ma di regola non infetta i mammiferi. Questo virus, come quello della rabbia, ha un involucro glicoproteico a punte, espresso in diverse configurazioni. Differenti glicoproteine ASLV sono conosciute come Env (da *envelope*, involucro), a cui segue un'etichetta per la sua forma particolare. Ogni sottotipo si lega a un recettore specifico. EnvA, per esempio, si lega a un recettore chiamato TVA (per avian Tumor receptor Virus A). Se non ha il recettore TVA, una cellula non può essere infettata da un virus rivestito da EnvA. L'interazione selettiva permette di confinare l'infezione iniziale del virus della rabbia a un solo tipo di neurone.

Introducendo il gene per la glicoproteina EnvA in una coltura cellulare infettata dal virus della rabbia, Wickersham e Callaway hanno sostituito il rivestimento glicoproteico originario sul virus della rabbia con la EnvA ricavata dal virus aviario. Così modificato, il virus della rabbia non riusciva a indurre alcuna cellula di mammifero a farlo entrare. Dotando il neurone d'interesse del recettore TVA, gli scienziati potevano garantirsi che il virus della rabbia avrebbe infettato solo quella cellula.

Il neurone bersaglio (in realtà una classe di neuroni) era stato anche provvisto di un AAV contenente il gene per la glicoproteina del virus della rabbia. Una volta all'interno si è spogliato del costume da pollo, ha indossato il suo mantello normale ed è saltato nei neuroni a monte. Modificando geneticamente il virus della rabbia affinché infettasse e saltasse una sola volta da un gruppo ben definito di neuroni «iniziali», i ricercatori potevano, a questo punto, ottenere un'immagine chiara dei circuiti del cervello.

Usare un virus per tracciare circuiti

Il virus della rabbia si fa strada dalla sede del morso al cervello saltando da un neurone al successivo. Virologi e neuroscienziati hanno imbrigliato e modificato questa capacità per osservare come i neuroni si collegano in circuiti complessi.

La patologia normale della rabbia

Il virione della rabbia, o particella virale, ha un rivestimento formato da una glicoproteina (un tipo di proteina) che induce subdolamente un motoneurone adiacente a farlo entrare (1). Il virus entra in una sinapsi, o porta, che normalmente è usata per inviare informazioni ad altri neuroni. Una volta all'interno, il virus si spoglia del suo rivestimento per liberare il suo genoma, che è formato da RNA invece che da DNA (2). L'RNA usa la macchina metabolica del neurone per produrre molteplici copie di se stesso e delle proteine essenziali per il virus (3). Le proteine e i filamenti di RNA si riassemblano nei virioni figli (4) che si spostano a monte verso i neuroni connessi (5). In questo modo il virus si sposta da un neurone al successivo nel suo cammino verso il cervello, dove continua a propagarsi (6).

Attacco 1: modificare geneticamente l'RNA del virus della rabbia

Per seguire il percorso esatto del virus, gli scienziati hanno sostituito il gene per la glicoproteina nel suo RNA con un gene per una proteina fluorescente. L'RNA modificato ha prodotto la proteina brillante, così il neurone infettato brillava, ma non poteva produrre la glicoproteina. Quindi, il virus non poteva spostarsi nel neurone successivo. I ricercatori hanno poi aggiunto nel neurone bersaglio un virus innocuo (detto AAV), che aveva un gene per la glicoproteina del virus della rabbia aggiunto al suo DNA. Quel gene produceva la glicoproteina, che i virioni potevano sfruttare per saltare una volta sola.

Attacco 2: Modificare il rivestimento glicoproteico

Per limitare l'infezione del virus della rabbia ai neuroni di interesse, gli scienziati hanno sfruttato il fatto che la glicoproteina si presenta in vari tipi. I rivestimenti glicoproteici dei virus che, per esempio, hanno come bersaglio gli uccelli, non riescono di regola a entrare nelle cellule dei mammiferi. Così, sostituendo il rivestimento glicoproteico del virus della rabbia con quello di un virus aviario, gli scienziati si erano garantiti che non potesse infettare i topi. A questo punto, nei topi hanno dotato solo i neuroni di interesse delle porte che permettono l'ingresso di glicoproteine aviarie. Il virus modificato marcava solo i neuroni di interesse e quelli da cui ricevevano i segnali.

Punto di infezione iniziale
Virione della rabbia
Glicoproteina
Direzione «a monte» dell'infezione della rabbia verso il cervello
Neurone
Glicoproteina
Motoneurone
1 Legame e ingresso
Recettore della glicoproteina
RNA
2 Spoliazione
Bersaglio dell'attacco 1: glicoproteina
3 Produzione dei componenti del virione
4 Assemblaggio del virione figlio
5 Infezione del neurone adiacente
6 Nel cervello i virioni si diffondono da neurone a neurone
Bersaglio dell'attacco 2: neurone di interesse

Illustrazione di Kelly Murphy

Modulare la rabbia

Semplicità ed eleganza del sistema delta-G del virus della rabbia (come l'hanno chiamato i suoi inventori, per via della glicoproteina modificata) hanno avuto successo nella comunità dei neuroscienziati. Usandolo, i ricercatori potevano vedere direttamente quali tipi di neuroni inviavano segnali ai neuroni di interesse. Ma come ogni nuova tecnologia aveva le sue imperfezioni: talvolta il numero di connessioni marcate era piuttosto piccolo, nell'ordine di dieci per ogni neurone iniziale.

Verso il 2015 Thomas Reardon, Thomas Jessell, Attila Losonczy e il sottoscritto, allora alla Columbia University, usavamo il sistema per capire i circuiti neurali che guidano i comandi motori. Individuando un numero relativamente basso di connessioni con i neuroni motori nel midollo spinale o nel cervello, ci venne il dubbio di avere ricavato un quadro incompleto dei circuiti. Un altro problema era la neurotossicità. Una volta che il virus era in una cellula, avrebbe cominciato a disintegrarsi e a morire in un paio di settimane. Se il virus induceva i singoli neuroni a modificare il proprio comportamento, l'interpretazione di qualsiasi osservazione poteva essere problematica.

Schnell e Christoph Wirblich, entrambi alla Thomas Jefferson University, avevano svolto un lavoro pionieristico sulla biologia del virus della rabbia. Quindi ci rivolgemmo a loro per un aiuto. Sapevano che i nostri problemi derivavano dal ceppo di virus che usavamo, in origine sviluppato per un vaccino. I vaccini incorporano speciali ceppi del germe che l'uomo ha selezionato affinché si riproducano con insolita rapidità; così la moltitudine di virioni figli fa scoppiare le cellule infettate e allerta il sistema immunitario prima che sia troppo tardi. Ciò ha suggerito un modo per affinare il nostro sistema. Poiché studiavamo i topi, i nostri collaboratori virologi suggerirono che avremmo invece dovuto provare un ceppo affinato negli anni per infettare i neuroni di topo.

Il virus parentale di questo ceppo era stato isolato originaria-

mente in natura e poi «fissato» in laboratorio, trasmettendolo tramite cervelli di topo o linee cellulari. Si era quindi evoluto come specialista nel mirare al sistema nervoso di questo roditore. Dopo aver costruito un meccanismo di tracciamento neuronale basato su questo ceppo specifico per il topo abbiamo scoperto che marcava un numero di connessioni molto maggiore di quanto avessimo osservato. Inoltre, essendo esperto nell'eludere il sistema immunitario di questo animale, il ceppo produceva quantità relativamente scarse di ciascuna proteina. In questa sua veste, sollecitava meno la macchina della cellula ospite e permetteva ai neuroni di conservare una salute relativamente buona.

Abbiamo modificato il nostro sistema per sostituire il gene della proteina fluorescente nel virus della rabbia con un gene per una proteina sensibile alla luce, la canalrodopsina (ChR), scoperta nelle alghe verdi. Quando è attivata da luce blu, questa proteina apre un canale che permette a ioni carichi positivamente di entrare nel neurone bersaglio, inducendolo a emettere un segnale elettrico. Per inciso, la cellula infettata continuava a brillare perché avevamo usato una versione di ChR che includeva una proteina fluorescente. Con questo sistema di virus della rabbia, finemente modulabile, potevamo osservare interi circuiti neuronali scaricare durante azioni del topo, oppure attivarli o disattivarli, e tutto questo fino a un mese dopo che il virus aveva infettato un neurone. Avevamo così un ampio margine di tempo per eseguire molti test con cui capire come circuiti specifici generano il comportamento.

Evoluzione naturale e ingegneria mirata insieme hanno dato uno strumento assai potente

Diagramma di cablaggio

Usando versioni diverse del sistema, gli scienziati hanno indagato molti circuiti nel sistema nervoso, per capire come contribuiscono a percezioni e comportamenti degli animali. Consideriamo, per esempio, il sistema visivo. Quando la luce entra nell'occhio, i neuroni sul lato posteriore della retina, le cellule gangliari retiniche, trasmettono segnali al cervello. I neuroscienziati ritengono che questa informazione si diriga verso sedi intermedie nel cervello, per finire nella corteccia cerebrale, la materia grigia, dove viene elaborata. Il gruppo di Botond Roska, al Friedrich Miescher Institute for Biomedical Research di Basilea, in Svizzera, ha usato il sistema del virus della rabbia per rintracciare gli input dalle cellule gangliari retiniche al nucleo genicolato laterale (NGL), un'area del cervello considerata solo un'ulteriore stazione di ritrasmissione alla corteccia.

I ricercatori hanno dimostrato che l'NGL contiene tre tipi di neuroni, ciascuno dei quali elabora probabilmente l'informazione visiva in modo diverso. In effetti, meno di un terzo dei neuroni fungeva da stazione di ritrasmissione fornendo una linea diretta dalla retina alla corteccia; un altro terzo circa, però, riceveva combinazioni di segnali differenti dallo stesso occhio; i neuroni restanti (circa il 40 per cento) ricevevano segnali da entrambi gli occhi. Così, anche se l'NGL risiede in uno stadio precoce del circuito visivo, buona parte dei suoi neuroni integra informazioni da molteplici fonti. Questa scoperta illumina il processo con cui il cervello interpreta le informazioni dagli occhi.

Alla Columbia University abbiamo studiato i neuroni nel nucleo vestibolare laterale (NVL), una regione del cervello che cerca di impedirci di cadere. Immaginate di essere sulla metropolitana che si ferma di colpo. Prima che abbiate il tempo di pensare, spostate i piedi per controbilanciarvi, irrigidite le gambe e magari vi aggrappate al corrimano. Come fa il cervello ad attivare il gruppo giusto di muscoli così rapidamente in una pluralità di situazioni?

Abbiamo scoperto che l'NVL dei topi contiene due tipi di neuroni anatomicamente distinti, ciascuno dei quali ha differenti connessioni a valle con parti del sistema nervoso. Un primo gruppo si attiva rapidamente dopo che il cervello ha percepito che il corpo è instabile; questi neuroni agiscono per estendere gli arti, ampliando la base di sostegno. Poi si attiva un secondo insieme di neuroni NVL. Servono a rinforzare e stabilizzare le articolazioni nello stesso arto, permettendo al corpo di essere spinto all'indietro, verso la sua posizione originaria. Potevamo attivare i neuroni accendendo una luce blu trasmessa da fibre ottiche. Quando la luce arrivava, i topi regolavano la posizione degli arti, come per evitare di capitombolare, anche quando non erano sbilanciati.

Nao Uchida, della Harvard University, ha indagato una terza questione: quali sono le funzioni di neuroni che rilasciano dopamina? Sappiamo che in due regioni del cervello – substantia nigra pars compacta (SNc) e area tegmentale ventrale (ATV) – questi neuroni «dopaminergici» rispondono alle ricompense. Si eccitano quando un animale usato nel test riceve una ricompensa o quando uno stimolo sensoriale predice che è imminente. Pensate a una barretta di cioccolato e al fruscio dell'incarto. Per capire quali tipi di informazione ricevevano i neuroni, gli scienziati dovevano sapere come erano connessi ad altri circuiti cerebrali. Usando il sistema delta-G, Uchida ha scoperto che neuroni dopaminergici nell'SNc ricevevano informazioni sulla rilevanza di uno stimolo: questo rumore dell'incarto preannuncia forse cioccolato per me? Viceversa, l'ATV riceveva informazioni sulla qualità: quanto è buono questo cioccolato?

Sappiamo che nel Parkinson i neuroni dopaminergici nell'SNc degenerano. Cosa sorprendente, Uchida e i colleghi hanno anche scoperto che gli input principali verso questi neuroni nell'SNc provengono dal nucleo subtalamico, una piccola regione del cervello a forma di lente, coinvolta, insieme a nuclei simili, nel controllo del movimento. Eccitare il nucleo subtalamico inserendo un elettrodo è spesso efficace per alleviare i sintomi del Parkinson. Ipotizzando che gli input da loro scoperti spiegassero perché la stimolazione funziona, i neuroscienziati hanno pensato che puntare su altre regioni cerebrali – che, come avevano scoperto, inviano a loro volta input all'SNc – potrebbe giovare ad alcuni pazienti.

La combinazione di evoluzione naturale e di ingegneria mirata ha dato uno strumento assai potente. Resta ancora molto spazio per i miglioramenti. Per esempio, sarà possibile modificare geneticamente virus che si spostano verso valle, marcando così i segnali in uscita, gli output, invece degli input? Potremo fabbricare un virus che etichetta solo connessioni attive tra neuroni, illuminando i circuiti coinvolti in comportamenti particolari? È arrivato il tempo in cui un virus che ha manipolato e terrorizzato l'uomo per millenni sia manipolato al nostro servizio. ■

PER APPROFONDIRE

Monosynaptic Restriction of Transynaptic Tracing from Single, Genetically Targeted Neurons. Wichersham I.R. e altri, in «Neuron», Vol. 53, n. 5, pp. 639-647, 1 marzo 2007.

Whole-Brain Mapping of Direct Inputs to Midbrain Dopamine Neurons. Watabe-Uchida M. e altri, in «Neuron», Vol. 74, n. 5., pp. 858-873, 7 giugno 2012.

EVOLUZIONE

Jon Foster

La vera paleodieta

Microscopici segni di usura su denti fossili rivelano ciò che mangiavano i nostri antenati, gettando luce sull'influenza dei cambiamenti climatici sull'evoluzione umana

di Peter S. Ungar

Peter S. Ungar è paleontologo all'Università dell'Arkansas. Compie ricerche sulla dieta e sugli adattamenti alimentari dei primati, fossili e viventi, compresi gli antenati dell'uomo. Il suo ultimo libro è *Evolution's Bite* (Princeton University Press, 2017).

Una sera del 1990, nella stazione di ricerca di Ketambe, del Parco nazionale di Gunung Leuser, in Indonesia, ero seduto a trascrivere alcuni appunti alla luce di una lampada a kerosene nella mia capanna sulle sponde del fiume Alas. Qualcosa mi impensieriva. Ero lì a raccogliere dati per la mia dissertazione di dottorato, documentando con che cosa e come si alimentavano le scimmie e le antropomorfe locali. L'idea era di collegare quelle osservazioni alle dimensioni, alle forme e ai segni di usura dei loro denti. Il macaco di Giava (*Macaca fascicularis*) ha incisivi larghi e molari smussati: denti ideali per mangiare frutta, secondo l'opinione corrente. Eppure quelli che avevo seguito negli ultimi quattro giorni sembravano alimentarsi esclusivamente di germogli. Mi stavo rendendo conto che il rapporto tra la forma e la funzione dei denti è più complicato di quanto suggeriscono i libri di testo, e che la forma e le dimensioni dei denti di un animale non determinano per forza ciò che mangia. Potrebbe suonare come una scoperta enigmatica, ma ha implicazioni cruciali per capire come si sono evoluti gli animali, esseri umani compresi.

Sono un paleontologo, e mi guadagno da vivere ricostruendo il comportamento di specie estinte a partire dai loro resti fossili. Nello specifico, lavoro per comprendere come, in passato, gli animali si procuravano il cibo dall'ambiente circostante e, di conseguenza, in che modo i cambiamenti ambientali hanno influito sull'evoluzione. Quell'anno a Ketambe ha cambiato il mio modo di pensare ai primati e, più in generale, alla comunità di esseri viventi che li circonda. Ho iniziato a considerare la biosfera (la parte del nostro pianeta che ospita la vita) come una specie di gigantesco buffet: gli animali trotterellano con i piatti in mano verso il banco del ristorante per scegliere tra il cibo disponibile in un dato luogo e in un dato momento. Il posto di ogni specie nella foresta, e nella natura, è definito dalle scelte che compie.

Nella scelta del cibo, i denti ricoprono un ruolo importante: servono gli utensili giusti. A Ketambe, però, ho imparato che la disponibilità è ancora più importante. I macachi di Giava mangiavano le foglie perché questo era ciò che la natura aveva messo a disposizione nel buffet della biosfera in quel luogo e in quel momento. La loro dieta cambiava durante l'anno man mano che le foglie si dispiegavano, i fiori sbocciavano e i frutti maturavano con il passare delle stagioni. Cominciai a chiedermi in che modo i cambiamenti nella disponibilità dei cibi potessero influenzare l'alimentazione di una specie nel corso dei secoli, dei millenni o ancora più a lungo.

La maggior parte dei paleontologi, di solito, non pensa in questo modo alla vita nel passato. Tradizionalmente nel nostro campo si inferisce la funzione dalla forma, nell'ipotesi che la natura selezioni gli strumenti migliori per qualsiasi compito debba svolgere un dato organismo. Se la forma seguisse sempre la funzione, tuttavia, i macachi non mangerebbero foglie. Ma come si fa a scoprire le scelte alimentari nel record fossile?

Ho trascorso decenni a fare esattamente questo, studiando microscopici segni di usura sui denti dei fossili, compresi quelli di un certo numero di antenati dell'uomo. Altri ricercatori, per ottenere indizi sulla dieta degli animali, hanno analizzato le firme lasciate sui denti dai componenti chimici dei vari alimenti. Queste «impronte alimentari», come le ho chiamate, rivelano il tipo di cibo effettivamente mangiato dagli individui e rispetto alla sola forma dei denti ci hanno offerto un quadro del passato molto più ricco. Queste scoperte, insieme ad altre relative al record paleoambientale, ci hanno consentito di testare alcune importanti ipotesi sull'impatto dei cambiamenti ambientali sull'evoluzione umana. I risultati perfezionano la classica spiegazione del perché il nostro ramo della famiglia ha avuto successo, e gli altri no.

Il pasto del gorilla

Le osservazioni di animali viventi hanno rivelato molte altre creature che mangiano cibi diversi da quelli per cui si sono adattate. Mentre ero a Ketambe, Melissa Remis, oggi alla Purdue University, stava raccogliendo dati sull'alimentazione dei gorilla a Bai Hokou, una zona bassa della foresta pluviale nel Parco nazionale di Dzanga-Ndoki, nella Repubblica Centrafricana. All'epoca la maggior parte dei ricercatori pensava che i gorilla fossero specializzati e si nutrissero di germogli, foglie e midollo di piante non legnose, come il sedano selvatico. Questo era ciò che avevano mostrato le ricerche pionieristiche di Dian Fossey e altri nelle foreste nebulari ad alta quota dei monti Virunga, in Uganda e Ruanda. La cosa aveva senso. I gorilla hanno denti e intestino estremamente specializzati: molari dalla punta affilata, molto adatti a tranciare le parti più dure delle piante, e una parte terminale dell'intestino

IN BREVE

La tradizione paleontologica presume che la forma e le dimensioni dei denti di un animale ne dettino la dieta. Ma la disponibilità di cibo, che cambia sia tra le stagioni sia su scale temporali più lunghe, è un fattore ancora più determinante nelle scelte alimentari.

L'analisi di usure microscopiche e delle tracce chimiche di cibo sui denti dei fossili stanno andando oltre gli studi convenzionali sulla forma dei denti, rivelando ciò che mangiavano davvero gli antenati dell'umanità.

Le scoperte sull'alimentazione, insieme ai dati paleoambientali, ci offrono nuove prospettive sul modo in cui i cambiamenti climatici hanno plasmato l'evoluzione umana.

I cercocebi dal mantello hanno molari piatti, con uno spesso strato di smalto, che sembrano specializzati per spezzettare cibi duri, ma le scimmie ripiegano su questi cibi soltanto quando non sono disponibili le foglie e i frutti soffici, che preferiscono.

Alain Houle

enorme, dove sono ospitati microorganismi che aiutano a digerire la cellulosa degli alimenti fibrosi. Senza contare che, a quelle altitudini, non c'era molto altro da mangiare.

In effetti i gorilla di montagna del Parco nazionale dei Virunga erano una popolazione piccola e marginale di qualche centinaio di individui che abitavano in un habitat estremo. Che dire dei 200.000 gorilla che vivevano oltre 1500 chilometri a ovest, nelle zone basse della foresta pluviale del bacino del fiume Congo? I gorilla di Bai Hokou raccontavano una storia diversa. Sembravano preferire frutti soffici e zuccherini. Remis osservò dei gorilla camminare per quasi un chilometro, oltrepassando foglie e germogli commestibili, per arrivare a un albero da frutto. A quanto pareva, gli alimenti fibrosi dominavano la loro dieta soltanto quando non erano disponibili i frutti, che preferivano chiaramente. Ma i gorilla delle zone basse occidentali, rispetto ai cugini delle montagne dei Virunga, erano schizzinosi, e questo limitava la quantità di dati che Remis poteva raccogliere. Alcuni ricercatori misero in dubbio che, con quei denti e quegli intestini, i gorilla potessero davvero preferire la frutta.

Una vecchia barzelletta recita: «Che cosa dai da mangiare a un gorilla di 180 chili? Tutto quello che vuole». Come possiamo sapere che cosa vuole mangiare un gorilla? Rientrata da Bai Hokou, Remis andò allo zoo di San Francisco a chiederlo direttamente a loro. Offrì agli animali in cattività una gran varietà di alimenti, dal dolce mango all'amaro tamarindo all'aspro limone, senza dimenticare il coriaceo sedano. I gorilla dello zoo preferivano chiaramente i frutti zuccherini e carnosi ai cibi coriacei e fibrosi, indipendentemente da quanto suggerissero i loro denti o il loro intestino.

Questa scoperta confermò che, nonostante i gorilla si siano adattati dal punto di vista chimico e meccanico agli alimenti più difficili, questi non sono il loro cibo preferito. Forse, quindi, i gorilla di montagna del parco dei Virunga mangiano cibi coriacei e fibrosi durante tutto l'anno non perché li preferiscono ma perché possono e soprattutto devono farlo, date le opzioni limitate offerte dal buffet della biosfera a quelle altitudini elevate. I gorilla di montagna che vivono a quote inferiori preferiscono la frutta, quando è disponibile.

Il paradosso di Liem

Preferire alimenti diversi da quelli a cui ci si è adattati è un'abitudine abbastanza comune nel regno animale da meritarsi un nome: paradosso di Liem. Negli anni ottanta Karel Liem, della Harvard University, osservò per la prima volta questo paradosso nel pesce d'acqua dolce *Herichtys minckleyi*, endemico della valle di Cuatro Ciénegas, nel Messico settentrionale. Una forma di questo pesce ha in gola denti piatti, simili a ciottoli, apparentemente ben adattati per rompere i gusci duri delle lumache. Ciò nonostante, i membri di questo gruppo oltrepassano le lumache senza degnarle di uno sguardo quando è disponibile cibo più soffice. Perché un animale dovrebbe evolvere denti specializzati per alimenti che gli piacciono di meno e che mangia raramente? Finché la specializzazione per cibi più duri non preclude il consumo di quelli più morbidi, può garantire una maggior varietà di opzioni quando ce n'è bisogno. Il paradosso, allora, non è tanto il fatto che gli individui evitino cibi a cui si sono adattati, ma che un'anatomia specializzata possa portare a una dieta più varia.

Altri primati, tra cui il cercocebo dal mantello (*Lophocebus albigena*) del Parco nazionale Kibale, in Uganda, esemplificano il paradosso di Liem. Queste scimmie hanno molari piatti e con smalto spesso, che sembrano fatti apposta per masticare cibi duri e croccanti. Eppure giorno dopo giorno, mese dopo mese e addirittura anno dopo anno Joanna Lambert, oggi all'Università del Colorado a Boulder, li ha osservati nutrirsi di germogli e di frutti soffici e carnosi, proprio come i cercopitechi dai denti piccoli e la coda rossa che vivevano nello stesso habitat. Poi, nell'estate del 1997, tutto cambiò. La foresta si stava riprendendo da una siccità particolarmente severa causata da un evento di el Niño. La frutta scarseggiava, le foglie stavano appassendo e le scimmie erano affamate. A differenza dei cercopitechi, i cercocebi dal mantello mangiarono più corteccia e semi duri: grazie ai denti e alle mascelle specializzate, riuscirono a ripiegare su cibi più difficili dal punto di vista meccanico. Anche se adattamenti del genere si rendono necessari soltanto una o due volte per generazione, può essere proprio ciò di cui c'è bisogno per superare i tempi di magra.

Un'anatomia specializzata può anche essere collegata a preferenze alimentari. Per esempio il cercocebo moro (*Cercocebus atys*) del Parco nazionale Taï, in Costa d'Avorio, ha uno smalto dentale spesso e mascelle forti e preferisce cibi duri. Gran parte del tempo che trascorre a cercare cibo è dedicata a esplorare il sottobosco alla ricerca di semi dell'albero *Sacoglottis*, che hanno involucri simi-

li ai noccioli della pesca. Secondo Scott McGraw, della Ohio State University, questa pratica consente loro di evitare la competizione per il cibo con le altre dieci specie di primati con cui condividono l'habitat. Così come nei gorilla ci sono variazioni nella frequenza con cui si nutrono di alimenti difficili dal punto di vista meccanico, alcuni cercocebi li mangiano sempre, mentre altri lo fanno soltanto raramente.

Esempi come questi mostrano che per i primati la scelta del cibo è una questione complessa: non dipende solo dai denti, ma anche dalla disponibilità, dalla competizione e dalle preferenze personali. La forma dei denti può dirci qualcosa su ciò che un animale era in grado di mangiare in passato, e quali erano le sfide alimentari più difficili che i suoi antenati hanno dovuto vincere. Per capire meglio le scelte operate tra le possibilità offerte dal buffet della biosfera, tuttavia, abbiamo bisogno delle impronte alimentari.

Le microusure dentali, i buchi e i graffi microscopici che si formano sulla superficie di un dente in seguito al modo in cui viene usato sono un tipo di impronta alimentare studiato abitualmente. In specie che tendono a tranciare o ad affettare i cibi più duri, come le antilopi erbivore o i ghepardi carnivori, si trovano lunghi graffi paralleli, lasciati mentre i denti opposti scorrono gli uni sugli altri trascinandosi dietro le sostanze abrasive. Le specie che frantumano cibi duri, come i cercocebi sgranocchiatori di noci del parco Taï, o le iene mangiatrici di ossa, tendono ad avere superfici dentali bucherellate di microusure di varie forme e dimensioni.

Dato che questi segni, tipicamente, si cancellano e sono sovrascritti nel giro di qualche giorno, possiamo imparare qualcosa sulla varietà, e forse anche sulle proporzioni, degli alimenti ingeriti se prendiamo in esame i denti di individui scelti in momenti e in luoghi diversi. Le microusure dei cercocebi del parco Kibale, tipicamente, assomigliano a quelle degli animali che si cibano di frutti soffici, con graffi sottili e forellini, anche se le superfici dei denti di alcune specie possono essere più bucherellate. I denti dei cercocebi del parco Taï, per contro, hanno in media superfici molto più ricche di crateri. Per quanto i denti delle due specie abbiano forma simile, le impronte alimentari le distinguono, come previsto sulla base dell'osservazione delle loro diete.

La forma dei denti può dirci qualcosa su ciò che un animale era in grado di mangiare e sulle sfide alimentari più difficili vinte dai suoi antenati. Ma per capire meglio le scelte operate nel buffet della biosfera servono le impronte alimentari

Antichi menu

Usando come guida le microusure degli animali viventi, le cui abitudini alimentari sono note grazie all'osservazione diretta, gli scienziati possono usare quelle sui fossili per inferire ciò che specie oggi estinte mangiavano ogni giorno e imparare molto sulle loro scelte alimentari. Tenendo conto di questo, ho analizzato con grande impegno, insieme ad alcuni colleghi, le microusure di fossili umani. Il nostro lavoro ha prodotto risultati sorprendenti.

L'albero genealogico dell'uomo ha molti rami. Oggi *Homo sapiens* è la sola specie ancora in vita, ma tanto tempo fa sul nostro pianeta coabitavano molte specie umane, gli ominini. Perché il nostro lignaggio sia sopravvissuto e gli altri no, è una domanda ancora senza risposta. Le mie incursioni in questo mistero ebbero inizio quando mi misi a studiare le abitudini alimentari di uno di questi rami estinti, un gruppo di specie appartenenti al genere *Paranthropus*.

Questi ominini vissero nell'Africa orientale e meridionale durante il Pleistocene, tra 2,7 e 1,2 milioni di anni fa. Nessuna di queste specie è un nostro antenato diretto; si tratta piuttosto di esperimenti evolutivi che hanno camminato al fianco dei nostri primi progenitori. Le specie appartenenti al genere *Paranthropus* avevano molari e premolari grossi, piatti e con uno spesso strato di smalto, mascelle forti, creste ossee e cicatrici rivelatrici della presenza di muscoli masticatori grossi e potenti. Questi tratti indicano chiaramente una specializzazione alimentare verso la masticazione estrema; di conseguenza le specie di *Paranthropus* sembravano il candidato ideale per l'analisi delle microusure. Se insieme ai miei collaboratori non fossimo riusciti a capire che cosa mangiavano, avevamo ben poca speranza di ricostruire le abitudini alimentari di altri fossili di ominini con mascelle e denti meno caratterizzati.

Il primo a provare a ricostruire la dieta del genere *Paranthropus* fu il paleoantropologo John Robinson, nel 1954. Lo studioso credeva che i premolari e i molari larghi, piatti e con uno spesso strato di smalto di *Paranthropus robustus*, ritrovato in Sudafrica, si fossero evoluti per triturare vegetali come le foglie, i germogli, le bacche e i frutti selvatici più duri. Le scheggiature presenti su quei denti gli fecero pensare che *P. robustus* si alimentasse di radici e bulbi granulosi. Negli anni sessanta Phillip Tobias, dell'Università del Witwatersrand a Johannesburg, la pensava diversamente: secondo lui le schegge si formavano durante la masticazione di cibi duri, anziché granulosi.

All'epoca, Tobias stava descrivendo una nuova specie di *Paranthropus* dell'Africa orientale, *Paranthropus boisei*. Si dice che, dopo averne osservato il cranio per la prima volta, abbia esclamato: «Non ho mai visto uno schiaccianoci così notevole».

Ecco come nacque l'idea di un ominino specializzato nella masticazioni di noci. *Paranthropus* si differenziò apertamente dai primi fossili di *Homo* ritrovati negli stessi depositi sedimentari, con i loro denti e le loro mascelle più fini, i cervelli più grossi e gli strumenti di pietra per lavorare il cibo. La spiegazione fornita dai ricercatori per queste differenze fu soprannominata «ipotesi della savana». Man mano che, in tutta l'Africa, cominciarono a diffondersi le praterie, i nostri antenati si trovarono a un bivio evolutivo. Il genere *Paranthropus* andò in una direzione, evolvendosi per specializzarsi in parti delle piante della savana più dure e asciutte, come i semi e le radici. Le prime specie del genere *Homo*, invece, imboccarono un'altra strada, diventando sempre più versatili e adottando una dieta flessibile che includeva la carne. Secondo la teoria, questa flessibilità è il motivo per cui oggi noi siamo qui mentre il genere *Paranthropus* si è estinto.

Una storia notevole, e i primi studi sulle microusure compiuti da Frederick Grine, della State University of New York a Stony Brook, negli anni ottanta, mostrarono che i denti di *P. robustus* sono davvero più bucherellati di quelli dei suoi predecessori, con-

IMPRONTE ALIMENTARI

Graffi e forellini

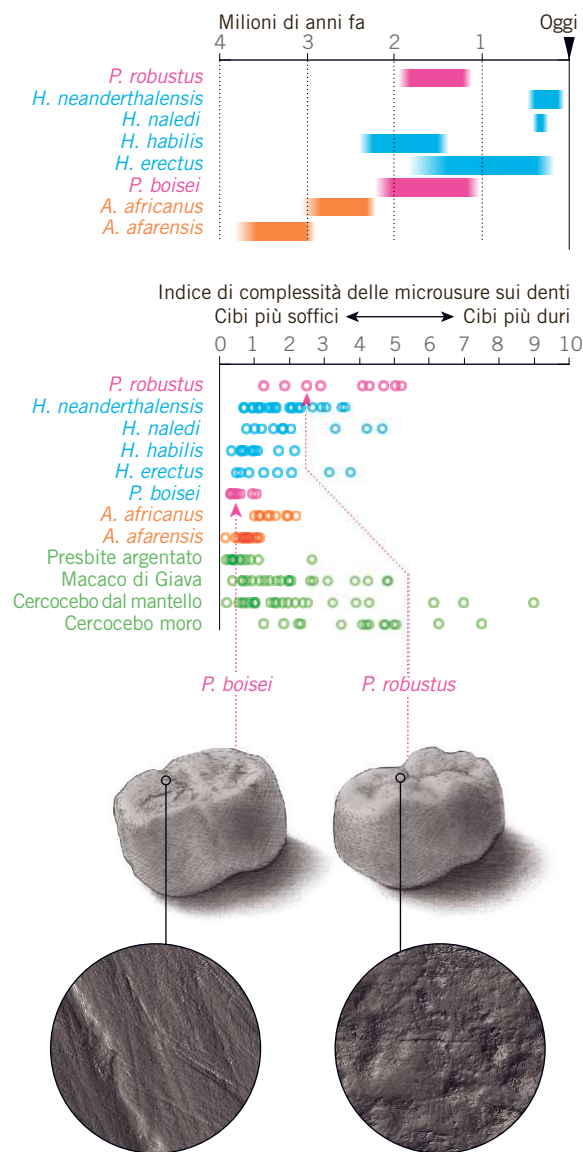
In seguito all'uso, sui denti si formano graffi e fori microscopici. Gli studi degli schemi di queste microusure in animali viventi mostrano che le specie che masticano cibi morbidi e coriacei come l'erba, per esempio, hanno sui denti graffi lunghi e paralleli; quelle che frantumano alimenti duri e croccanti come le noci, invece, hanno dei forellini. I paleontologi deducono l'alimentazione di specie umane estinte, tra cui *Paranthropus robustus* e *Paranthropus boisei*, sulla base della struttura delle microusure sui denti dei fossili.

Secondo studi precedenti basati sulla forma dei denti, *P. robustus* mangiava piante, mentre *P. boisei* si era specializzato in noci. Analisi delle microusure hanno invece rivelato che *P. robustus* aveva uno schema complicato di graffi e forellini, indicatore di un'alimentazione generalista. *P. boisei*, invece, non aveva i fori che ci si aspetterebbe da un mangiatore di noci. Analisi chimiche successive hanno indicato che *P. boisei* mangiava soprattutto erbe o piante erbacee come i falaschi.

Illustrazione di Portia Sloan Rollings (*denti*), Graficay Jen Christiansen; Peter S. Ungar (*dati e simulazioni delle microusure*)

fermando – apparentemente – che questo nostro cugino si era specializzato in cibi duri e croccanti.

Nel 2005, tuttavia, quando insieme al mio ricercatore post-doc Rob Scott osservai nuovamente le microusure in *P. robustus* con nuove tecnologie, cominciò a emergere un'altra parte della storia. In media gli esemplari di *P. robustus* avevano effettivamente superfici con microusure più complesse e bucherellate, ma alcuni di quelli che studiammo mostravano schemi più semplici, meno sforacchiati. Le microusure, in questa specie, variavano molto da un esemplare all'altro: alcuni dovevano aver mangiato cibi duri nei giorni prima di morire, altri no. In altre parole, il fatto che *P. robustus* avesse un'anatomia specializzata non implicava che fosse specializzato anche nella dieta. Non si trattava di un'idea nuova. Proprio l'anno prima David Strait, oggi alla Washington University a St. Louis, e Bernard Wood, della George Washington University, avevano ipotizzato (in gran parte sulla base di prove indirette) che *Paranthropus* fosse stato un «generalista» ecologico, con una dieta flessibile. Ma il nostro lavoro forniva prove dirette della presenza del paradosso di Liem tra gli ominini.

Una sorpresa ancora più grande arrivò nel 2008, quando insieme ad alcuni colleghi osservai le strutture delle microusure in *P. boisei*. Si trattava dello schiaccianoci di Tobias, la specie con i denti dalla superficie più ampia, le mascelle più pesanti e lo smalto più spesso di tutti gli ominini. Mi aspettavo che i denti di *P. boisei* avessero microusure simili a quelle del cercocebo moro, bucherellati come la superficie della Luna. E invece no. Ogni superficie esaminata rivelava graffi sottili in tutte le direzioni. Questi animali non soltanto non erano specializzati in alimenti duri, ma i loro denti non mostravano segno di averne mai toccato alcuno. L'ipotesi dello schiaccianoci sembrò crollare come un castello di carte. Che cosa aveva mai mangiato *P. boisei* con quei denti grossi e piatti? Per avere la risposta bisognava aspettare un altro tipo di impronte alimentari: il rapporto fra gli isotopi del carbonio.

Talvolta nei denti si conserva la firma chimica lasciata dagli alimenti che forniscono la materia grezza per costruire il corpo. Come le microusure, questi indizi chimici possono essere letti e decodificati. Le piante erbacee tropicali, per esempio, rispetto agli alberi e alle piante del *bush* hanno una maggior proporzione di atomi di carbonio con sette neutroni invece dei normali sei; i denti degli animali che se ne nutrono, di conseguenza, hanno una quantità superiore di carbonio «pesante».

I rapporti degli atomi di carbonio nei denti di *P. robustus* indicano una dieta dominata dai prodotti degli alberi e del bush ma con porzioni abbondanti di erbe tropicali e di falaschi. Questa scoperta è coerente con una dieta variegata. *P. boisei*, invece, mostra uno schema molto diverso, con i rapporti degli atomi di carbonio che suggeriscono che le erbe o i falaschi costituivano almeno i tre quarti della sua alimentazione.

Questo risultato ha sorpreso molti paleontologi. Un ominino che mangia come una mucca? Nessun membro rispettabile della nostra famiglia può sopravvivere nutrendosi di erba, no? Eppure, per me la cosa aveva un senso. Queste specie entrarono in scena proprio quando le praterie si stavano diffondendo in tutta l'Africa orientale e meridionale, e il buffet della biosfera si stava ricoprendo di un manto erboso. Se *P. boisei*, con i suoi denti grandi e piatti e le sue mandibole poderose, avesse triturato erba o prodotti dei falaschi anziché cibi duri e croccanti, le microusure sui denti avrebbero seguito lo stesso schema riscontrato da me e dai miei colleghi. Un'alimentazione del genere avrebbe anche spiegato la velocità con cui questa specie usurava i propri molari.

Guardando soltanto la forma dei loro denti piatti ed enormi non lo si capirebbe mai, ma le impronte alimentari suggeriscono che due specie di *Paranthropus* usassero la loro anatomia specializzata in modi diversi e insospettabili. Sembra che *P. robustus*, come i cercocebi del parco Kibale, abbia avuto una dieta generalista che includeva alcuni cibi duri. Nel caso di *P. boisei*, invece, la relazione tra dieta e dentatura sembra essere stata molto diversa da qualsiasi cosa sia possibile osservare nei primati di oggi. I denti grossi e piatti non erano certo ideali per masticare l'erba, ma bisogna adattarsi a quello che si ha. E dato che uno strumento adatto a triturare era meglio di quanto gli ominini disponessero in precedenza, sarebbe stato selezionato anche se non fosse stato ottimale per il compito da svolgere.

Le microusure dei nostri antenati diretti, quelli appartenenti al genere *Homo*, puntano a una strategia alimentare decisamente diversa. Insieme ai miei colleghi ho studiato due specie antiche: il più «primitivo» *Homo habilis*, un ominino dal cervello più piccolo che mantenne alcune delle caratteristiche legate alla vita sugli alberi, e *Homo erectus*, dal cervello più grande e più propenso a restare ancorato al suolo. I nostri campioni sono di piccole dimensioni, perché le microusure richiedono denti in condizioni ottimali – che non abbondano – ma ne emerge uno schema interessante. Rispetto al suo presunto antenato *Australopithecus afarensis* e al contemporaneo *P. boisei*, le microusure di *H. habilis* presentano un ventaglio più ampio di caratteristiche, con superfici bucherellate in modo complesso e altre ornate da semplici graffi. Questa scoperta suggerisce che l'alimentazione di *H. habilis* fosse più variegata rispetto a quella dei suoi predecessori e dei suoi contemporanei. Nel suo successore *H. erectus* si riscontrano poi microusure ancora più varie, forse dovute a una dieta ancora più diversificata.

Questi risultati si accordano bene con il modello che prende il posto dell'ipotesi della savana e spiega in che modo i cambiamenti climatici hanno plasmato l'evoluzione umana. Studi sui dati climatici compiuti grazie a carotaggi oceanici a metà degli anni novanta dal geologo Nicholas Shackleton hanno mostrato che l'ipotesi della savana non raccontava tutta la storia dei cambiamenti climatici. Le condizioni diventarono più fredde e asciutte sul lungo periodo, ma ci furono anche fluttuazioni climatiche di breve termine, che si intensificarono lungo il corso dell'evoluzione umana.

Secondo Rick Potts, della Smithsonian Institution, questa instabilità climatica avrebbe dovuto favorire specie più versatili, come gli ominini: un'idea che è diventata nota come «ipotesi della selezione della variabilità». L'Africa del Pleistocene non era un luogo adatto agli schizzinosi. Secondo Potts, a guidare l'evoluzione umana non fu tanto la diffusione dell'erba della savana, quanto il bisogno di flessibilità.

In questa prospettiva acquistano un senso elementi propri del genere *Homo*, come il cervello più grande e gli utensili in pietra per lavorare una gran varietà di alimenti. Avrebbero infatti consentito ai nostri antenati di sopravvivere a fluttuazioni ambientali sempre più intense e mantenere il passo mentre la natura metteva e toglieva sempre più velocemente i cibi dal banco del buffet della biosfera. Le variazioni crescenti nella complessità delle microusure, da *A. afarensis* a *H. habilis*, fino a *H. erectus*, potrebbero essere una prova diretta di questa selezione della variabilità.

L'idea di Potts ha resistito per i vent'anni successivi alla sua proposta; grazie anche ai contributi di altri studiosi sono emersi nuovi dettagli su come i cambiamenti dei paesaggi terrestri e dell'orbita del nostro pianeta intorno al Sole si sono combinati per dare origine alle condizioni in cui si sono evoluti gli esseri umani. Per esempio nel 2009 Mark Maslin, dello University College di Londra, e Martin Trauth, dell'Università di Potsdam, in Germania, hanno proposto che le fluttuazioni climatiche abbiano ciclicamente riempito e svuotato i laghi dell'Africa orientale, distruggendo la vita nei bacini del rift. Questo flusso potrebbe aver portato alla frammentazione e alla dispersione delle popolazioni di ominini, favorendo l'evoluzione del genere *Homo*. La capacità di adattarsi a una dieta più variabile avrebbe aiutato una specie a sopravvivere in tempi così turbolenti.

Appetito ed evoluzione

Sebbene le prove disponibili consentano a noi scienziati di dipingere un quadro plausibile di come i primi ominini si siano adattati ai cambiamenti del loro universo, riusciamo a farlo soltanto con pennellate approssimative. La sfida più seria alla comprensione del modo in cui i cambiamenti climatici dirigono l'evoluzione è riuscire a far combaciare specifici eventi climatici del passato con cambiamenti nelle testimonianze fossili.

Le impronte alimentari insegnano che l'alimentazione dei primi ominini variava nel tempo e nello spazio e che molto probabilmente ci siamo evoluti per essere mangiatori flessibili

Ogni ambiente locale reagisce in modo diverso ai cambiamenti del clima globali, e persino a quelli regionali; il nostro record fossile, molto semplicemente, non è abbastanza completo da dirci dove e quando una certa specie sia comparsa o scomparsa. Possono esserci incertezze di 1500 chilometri e 100.000 anni, o addirittura maggiori. Potremmo riuscire a collegare l'estinzione o l'evoluzione di una data specie a un evento catastrofico di portata enorme nella storia della Terra, come l'impatto dell'asteroide sulla penisola dello Yucatan che, 66 milioni di anni fa, spazzò via i dinosauri.

Gli eventi legati al clima che associamo all'evoluzione umana, tuttavia, sono di tipo molto diverso: si tratta di cicli ripetuti di condizioni fredde e secche, seguite da condizioni umide e calde. Il fatto che gli ominini, probabilmente, fossero specie flessibili, capaci di adattarsi a un ampio ventaglio di habitat e di cibi disponibili, complica ulteriormente le cose. La migliore opportunità che abbiamo a disposizione per comprendere la reazione degli ominini ai cambiamenti ambientali, di conseguenza, è posare lo sguardo su un passato più recente, in luoghi studiati in modo approfondito.

Le ricerche pubblicate negli ultimi due anni da Sireen El Zaatari, dell'Università di Tübingen, in Germania, Kristin Krueger, della Loyola University di Chicago, e altri colleghi mostrano come potrebbe funzionare questo approccio. I loro studi delle microusure dei Neanderthal e degli uomini anatomicamente moderni che li soppiantarono in Eurasia ci consentono di riconsiderare l'annoso mistero di questa sostituzione da una nuova prospettiva. I Neanderthal regnarono incontrastati in Europa e nell'Asia occi-

Diete divergenti: mentre *Paranthropus boisei* (1) si è specializzato per mangiare erba o falaschi, il suo contemporaneo *Homo habilis* (2) sembra aver avuto una dieta più variata.

dentale tra circa 400.000 e 40.000 anni fa. E poi scomparvero. Da oltre un secolo i paleontologi si chiedono che cosa sia successo, e perché, e ancora oggi non c'è un vero accordo generale.

Anche se spesso la tradizione popolare racconta la storia di brutali Neanderthal che vivevano praticamente in mezzo ai ghiacci, rifugiati in tane dove si abbuffavano di carne di mammut e rinoceronti pelosi, le cose non sono sempre andate così. Gli habitat dei Neanderthal erano molto diversi, dalle steppe fredde e asciutte alle foreste più calde e umide, e le condizioni variavano nel tempo e nello spazio. Studi recenti sui loro molari mostrano che i fossili dei Neanderthal che abitavano in ambienti boschivi o misti presentano microusure piene di forellini, indice di un'alimentazione composta di vegetali più duri, croccanti e forse anche abrasivi. Le microusure dei Neanderthal delle steppe, invece, sono meno complesse e secondo El Zaatari e colleghi sono legate a una dieta meno variabile, composta principalmente di carni morbide. Krueger, dal canto suo, ha trovato differenze tra i due gruppi nelle microusure degli incisivi; secondo la ricercatrice deriverebbero dal fatto che i Neanderthal delle steppe usavano gli incisivi per masticare le pelli degli animali, mentre i Neanderthal delle foreste mangiavano una gran varietà di cibi diversi. È interessante notare che queste differenze permangono indipendentemente dall'epoca in cui sono vissuti gli individui. Sembra che in generale i Neanderthal fossero flessibili, con diete legate all'habitat e alla disponibilità degli alimenti.

Tuttavia, se consideriamo gli uomini anatomicamente moderni che abitavano in Europa durante l'ultima era glaciale, lo schema cambia. Non c'è grande differenza nelle microusure dei molari tra gli individui che vivevano in ambienti aperti e quelli che occupavano aree miste, con una certa quantità di parti boschive, e neppure tra fossili risalenti a epoche diverse. Forse i primi uomini moderni erano più bravi dei Neanderthal a procurarsi i cibi preferiti anche quando subentravano cambiamenti climatici.

John R. Foster Science Source

Cibo per la mente

Gli studi dei primi regimi alimentari dell'uomo sono rilevanti anche per ciò che le persone dovrebbero mangiare oggi per essere in buona salute, anche se forse non nel modo a cui si pensa di solito. I guru della «paleodieta» sostengono che dovremmo mangiare i tipi di cibi per il cui consumo si erano evoluti i nostri antenati. Dichiarano che molte malattie cronico-degenerative sono legate a un disallineamento tra le nostre diete e i carburanti che il nostro corpo è stato «progettato» per bruciare.

Ricordare di tanto in tanto che i nostri progenitori non mangiavano *hotdog* e non bevevano bibite gassate non fa male, ma questo non significa che dovremmo seguire una specifica dieta paleolitica. Le impronte alimentari insegnano che l'alimentazione dei primi ominini variava nel tempo e nello spazio e che molto probabilmente ci siamo evoluti per essere mangiatori flessibili, adattabili a climi, habitat e disponibilità del cibo in continuo cambiamento. In altre parole, non esiste un'unica dieta ancestrale che possiamo replicare oggi. La versatilità alimentare ha consentito ai nostri antenati di diffondersi in tutto il pianeta, trovando sempre qualcosa da mangiare in tutte le miriadi di buffet della biosfera della Terra. E questo è stato un fattore chiave del nostro successo evolutivo. ■

PER APPROFONDIRE

Dental Microwear and Diet of the Plio-Pleistocene Hominin Paranthropus boisei. Ungar P.S. e altri in «PLoS One», Vol. 3, n. 4, articolo n. e2044, 30 aprile 2008.

The Diets of Early Hominins. Ungar P.S. e Sponheimer M., in «Science», Vol. 334, pp. 190-193, 14 ottobre 2011.

Neandertal versus Modern Human Dietary Responses to Climatic Fluctuations. El Zaatari S. e altri, in «PLoS One», Vol. 11, n. 4, articolo n. e0153277, 27 aprile 2016.

Shock climatici. Demenocal P.B., in «Le Scienze» n. 555, novembre 2014.

DISASTRI NATURALI

Uscita di emergenza

Il dilemma degli uragani: nel 2017, quando l'uragano Harvey si è diretto verso Houston, i funzionari pubblici hanno dovuto soppesare i pericoli di un'inondazione e quelli legati a un esodo di massa.

Evacuare un'intera città prima di una tempesta o un uragano è quasi impossibile. Nuove mappe dei rischi evidenziano chi ha davvero bisogno di andarsene

di Leonard Dueñas-Osorio, Devika Subramanian e Robert M. Stein

Leonard Dueñas-Osorio è ingegnere civile e ambientale alla Rice University.

Devika Subramanian è informatica alla Rice University.

Robert M. Stein è politologo alla Rice University.

Non volevamo danneggiare nessuno. Il nostro obiettivo era aiutare i nostri vicini dell'area metropolitana di Houston ad allontanarsi dal pericolo. Eppure nel 2015 cominciarono ad accumularsi telefonate e messaggi e-mail che dicevano tutti la stessa cosa: stavamo peggiorando la situazione. «State rendendo un cattivo servizio», ci disse un poliziotto di un distretto nella parte nord di Houston. E un meteorologo ci rimproverò: «Perché state dicendo alle persone che corrono un basso rischio di allagamento quando intorno a loro è tutto inondato?».

I messaggi riguardavano lo Storm Risk Calculator (SRC): la nostra mappa on line per il calcolo della pericolosità degli uragani, che avevamo sviluppato e messo in funzione per la città. L'avevamo progettata per dire ai residenti chi di loro doveva scappare davanti a un uragano in arrivo perché la sua casa rischiava di essere distrutta, e chi invece poteva restare perché era probabile che la sua casa sarebbe stata al sicuro. I pericoli erano reali: anni prima l'area era stata gravemente colpita dagli uragani Rita e Ike. Ma era chiaro che nella nostra mappa c'era qualcosa di sbagliato.

Quando città vicine alla costa come Houston sono colpite da violente tempeste tropicali, l'evacuazione sembra il modo più ovvio di proteggere le persone. Anche spostare milioni di individui, però, comporta dei rischi. Nel 2005, quando la nostra zona fu presa di mira dall'uragano Rita, i funzionari dissero a tutti di andarsene. Ingorghi infiniti trasformarono in parcheggi le statali 45 e 10 e la U.S. Route 59: gli abitanti di quartieri a basso rischio, scappando da Houston, stavano bloccando le vie di fuga a chi ne aveva più bisogno, ossia i residenti delle aree che si trovavano direttamente lungo il percorso dei forti venti, delle piogge violente e dell'onda di tempesta (il cosiddetto *storm surge*). A causa dell'estremo calore, qualcuno morì per strada. Un autobus che stava evacuando gli ospiti di una casa di riposo prese fuoco e l'esplosione di una tanica di ossigeno uccise 23 dei suoi passeggeri. Di conseguenza nell'agosto 2017, quando l'uragano Harvey ha colpito Houston, il sindaco Sylvester Turner si è rifiutato di ordinare l'evacuazione. «Non è possibile mettere per strada 6,5 milioni di persone», ha detto. «Se pensate che adesso la situazione sia brutta, date l'ordine di evacuazione e creerete un vero e proprio incubo».

Negli anni successivi al passaggio di Rita e Ike, noi tre (un ingegnere, un'informatica e un politologo esperto di sicurezza pubblica) decidemmo di aiutare Houston a sistemare questa situazione angosciante. Costruimmo la nostra mappa interattiva SRC per mostrare le regioni sicure e a rischio nel caso di venti della forza degli uragani e di onde di tempesta. Ma via via che arrivavano le lamentele imparammo che la nostra mappa era basata sulle cose sbagliate. I residenti di Houston e dell'area circostante, la contea di Harris, non erano preoccupati soltanto dagli uragani ma anche dalle gravissime inondazioni causate dalle piogge molto intense, che nella zona sono molto più frequenti. Inoltre la gente voleva essere informata dei rischi a una scala molto più piccola di quella offerta dalla nostra mappa.

Questo ci ha spinto a intraprendere un grande progetto di ricerca per capire in che mdo le persone valutano il rischio e sviluppare nuove fonti di informazioni utili. Abbiamo quindi ricostrui-

IN BREVE

Nelle grandi città, il tentativo di fuggire da un uragano ha provocato il panico di massa e intasato le vie di fuga, con esiti fatali.

Il problema è che gli allarmi erano troppo generici e mettevano insieme persone ad alto e a basso rischio relativamente ai danni provocati dagli uragani e dalle alluvioni.

Un nuovo tipo di mappa dei rischi attualmente in fase di test a Houston, che è molto soggetta alle alluvioni, usa dati su piccola scala per individuare le abitazioni ad alto rischio e rassicurare chi non ha bisogno di andarsene.

Marcus Yam/Getty Images (*pagine precedenti*)

Non un semplice temporale: a Houston non è necessario un uragano per allagare i quartieri. Le piogge intense mettono spesso a repentaglio case e persone, come è successo nel 2016.

David J. Phillip/AP Photo

to da zero la nostra mappa dei rischi, usando dati più dettagliati sui reali pericoli per le abitazioni e i residenti della nostra area. La nuova mappa, che entrerà nella fase di test quest'anno, unisce dati migliori su più tipologie diverse di precipitazioni a un sistema di intelligenza artificiale all'avanguardia: riusciremo così a mostrare ai cittadini i rischi che corrono a livello di singoli isolati, oltre alle migliori vie di fuga. Se il modello funziona come speriamo, potrà essere usato da chi gestisce le emergenze per sfruttare le risorse in modi finora impensabili e salvare più vite umane.

Rischi calcolati

Quando avviammo il progetto SRC volevamo stimare i principali rischi collegati agli uragani, come i danni provocati dall'onda di tempesta, dal vento, dall'innalzamento delle acque dei *bayou*, aree umide tipiche del delta del Mississippi, e dai blackout di corrente elettrica. Usavamo dati in tempo reale relativi ai campi di vento provenienti dalla National Oceanic and Atmospheric Administration, insieme ai livelli delle precipitazioni comunicati dal Flood Warning System della contea di Harris e alle caratteristiche degli edifici fornite dall'Harris County Appraisal District, come la data di costruzione (che rivela la solidità dell'ancoraggio del tetto ai muri). Il modello risultante prevedeva i rischi di blackout o di danni alle abitazioni in aree della grandezza di un chilometro quadrato. Quando lo testammo con varie simulazioni di uragani e con i danni causati nella realtà dall'uragano Ike, in ogni quadrato il livello di precisione era superiore al 70 per cento. I precedenti piani di evacuazione prevedevano solo elementi quali il punto di massimo avvicinamento delle onde di tempesta in aree geografiche estese anche centinaia di chilometri quadrati. La nuova mappa era un notevole miglioramento.

Per capire come funziona SRC nella pratica, immaginate un uragano nel Golfo del Messico che colpirà Houston entro un paio di giorni. Un'abitante, che chiameremo Alice, deve solo digitare il proprio indirizzo e visualizza una cartina. Una scala cromatica dei livelli di rischio (basso, medio e alto) indica le probabilità di danni causati dal vento, dall'onda di tempesta, dalla tracimazione dei bayou e dai blackout. Nel caso di Alice il rischio di danni provocati dal vento è piuttosto elevato: la sua casa a due piani, costruita negli anni sessanta, si trova davanti un parco aperto di fronte a un bayou. Si sa che i venti non rallentano nelle aree aperte e il *bayou* si riempirebbe di acqua piovana portata dal vento, aumentando le probabilità di allagamenti.

Un altro utente della mappa, Bob, che abita a un paio di chilometri di distanza, è meno a rischio. La sua abitazione a un solo piano, costruita negli anni novanta, è circondata da alberi. Una casa più bassa è meno esposta al vento, il quale, rallentato dalla vegetazione, ha un impatto minore; il sistema di connessione tra i muri e il tetto, più moderno, rende la struttura della casa di Bob più resistente, anche se i rami spezzati possono comunque cadere sulle linee dell'alta tensione, aumentando le probabilità di un blackout. Bob, inoltre, è più lontano dal bayou, e questo abbassa il rischio di inondazioni. Grazie a queste informazioni più dettagliate sui rischi reali, Alice può decidere di andarsene e Bob di restare, anche se entrambi si trovavano ad affrontare lo stesso uragano.

Subito dopo che la città ne comunicò l'attivazione, nel giugno

2012, il nostro calcolatore dei rischi divenne popolare: nei giorni immediatamente successivi al lancio fu usato da circa 40.000 persone. Presto gli utenti scesero a circa 1000 al mese, e il numero rimase stabile negli anni seguenti.

Zone pericolose. Questa mappa di un'area di due chilometri quadrati della città di Houston, estratta dal programma informatico HARVEY, prevede gli effetti di 20 centimetri di precipitazioni. Una residente (Alice) sarà colpita in pieno da un evento alluvionale, mentre un altro (Bob) è meno a rischio.

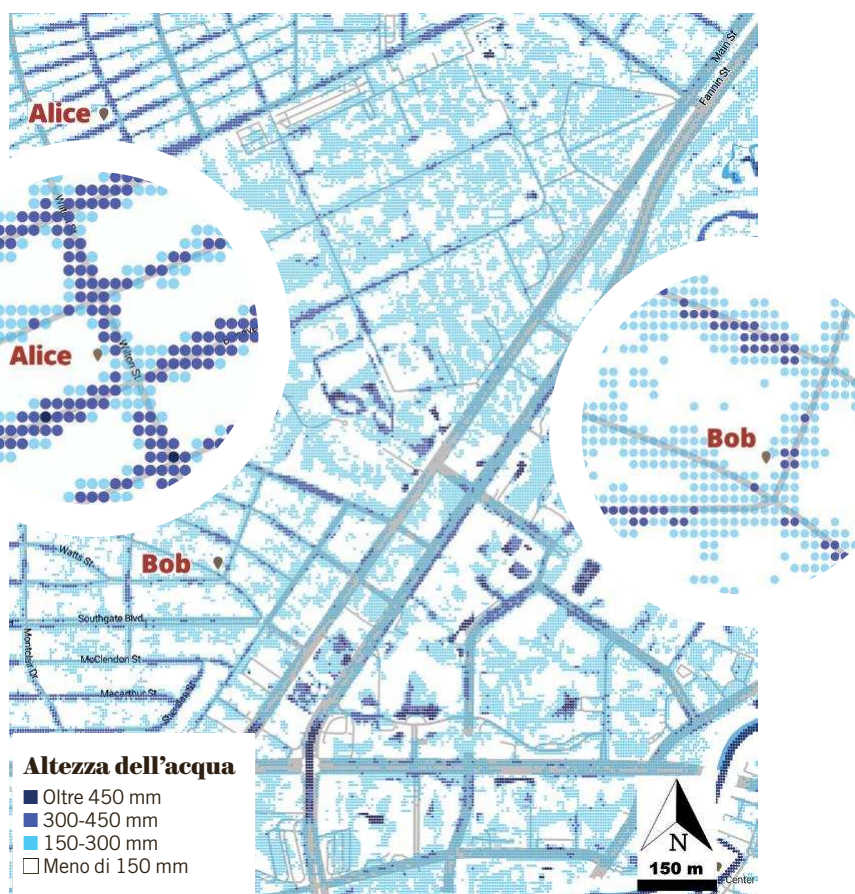
Hesam Talebiyan, Jayant Patil e Kyle Shepherd/Rice University

Ma c'era qualcosa di strano. Dal giorno del lancio fino al 2016 Houston non è stata colpita da uragani, eppure il traffico sul sito aumentava a dismisura in concomitanza con i momenti di precipitazioni intense. Una forte pioggia può causare molti problemi. La città si espande e la rapida crescita ha fatto sì che aree erbose permeabili e canali di scolo siano stati sostituiti da chilometri di asfalto, che fanno deviare l'acqua nei quartieri, dove allaga le case. Nel 2015 ci sono state le alluvioni del Memorial Day e di Halloween, nel 2016 quella del Tax Day, durante le quali sono caduti da 20 a 30 centimetri di pioggia. Alcuni bayou non sono riusciti a far defluire tutta l'acqua e hanno rotto gli argini, distruggendo alcune case. Quando le previsioni meteorologiche locali hanno cominciato a parlare di molte ore di piogge intense, la gente si è rivolta alla nostra mappa.

E sfortunatamente la mappa non dava le informazioni giuste. Era stata progettata per prevedere gli effetti dell'acqua del Golfo del Messico trasportata verso l'entroterra da un uragano e i danni provocati da venti più veloci di 120 chilometri all'ora. Decine di centimetri di pioggia caduta direttamente dal cielo avevano effetti diversi. Nelle aree interne poteva piovere tantissimo, per esempio, ma la nostra mappa non lo avrebbe indicato come un rischio. E qui cominciammo a ricevere le lamentele.

Il colpo di grazia è arrivato nel 2016, quando il server che ospitava il nostro programma è stato preso di mira da un gruppo di hacker, che ci hanno chiesto del denaro per restituirci l'accesso al nostro sito. Al tempo stesso, più sembrava che il sito stesse offrendo informazioni sbagliate, più aumentavano le probabilità che le persone perdessero fiducia nel programma. È stata la classica goccia che fa traboccare il vaso: non avremmo pagato nessun riscatto, ma avremmo ricostruito un calcolatore dei rischi sulla base delle necessità effettive degli abitanti di Houston, e non solo in relazione alla stagione degli uragani.

Ridisegnare la mappa

Per prima cosa ci siamo messi in contatto con Rick Wilson, uno scienziato sociale comportamentista che studia i processi decisionali. Insieme abbiamo progettato una serie di esperimenti on line usando mappe dei rischi in cui centinaia di abitanti di Houston erano assegnati a vari livelli di risoluzione dei dati e di tipi di rischio. Ci siamo concentrati sul tempo passato a fare ricerche su una mappa: un tempo maggiore indicava che i cittadini erano interessati ai rischi connessi agli uragani ed erano pronti ad agire per prepararsi. Anche se gli uragani più potenti (di categoria quattro o superiore) ricevevano l'interesse maggiore, l'attenzione spariva se i dati geografici sugli effetti della tempesta non erano locali. Alla gente non interessavano mappe divise in aree di un chilometro di lato, o raggruppate per codice postale. Ma quando la mappa mostrava i dati quasi per ogni singolo isolato centinaia di persone si mettevano a cercare più informazioni. Abbiamo anche imparato che, soprattutto nell'entroterra, la quantità di precipitazioni previste interessava più delle proiezioni sull'altezza dell'onda di tempesta. Le piogge molto intense influenzano la mobilità, la produttività e la sicurezza delle persone.

Questi esperimenti comportamentali ci hanno mostrato che le persone prestano attenzione soprattutto ai rischi che percepiscono come più rilevanti per la propria situazione specifica. Con il senno di poi, ora questo ci appare ovvio, ma pensate a quanto è in contrasto con il modo in cui oggi si comunicano le informazioni sugli uragani: dichiarazioni ufficiali generiche relative a eventi rari che riguardano aree di centinaia di chilometri quadrati.

Abbiamo quindi cominciato a costruire un sistema basato sull'accumulo e il deflusso dell'acqua piovana con un nuovo focus sugli eventi locali. L'abbiamo battezzato Hurricane and Rain Vectorized Exposure Yielder, o HARVEY.

Il nostro modello ha un reticolo geografico molto più fitto della mappa precedente: le celle sono di appena qualche metro quadrato, anziché di qualche chilometro quadrato. Una singola strada può attraversare molte celle, e per ricoprire tutta la città ce ne sono oltre 100 milioni. Questa configurazione offre stime molto più precise dei flussi d'acqua sul terreno e della loro profondità nel caso di piogge intense.

Per ottenere queste stime abbiamo usato un gran numero di fonti diverse. Tra queste c'era ovviamente lo storico delle previ-

sioni e dei dati del National Weather Service, ma il nostro modello incorpora anche i luoghi da cui sono partite le telefonate al servizio di informazioni della città di Houston che riferivano di inondazioni locali. Possiamo anche usare le richieste d'aiuto ai vigili del fuoco e alla polizia: ripetute telefonate provenienti da un luogo specifico indicano la presenza di punti critici ricorrenti. La contea di Harris ci trasmette i dati raccolti dalla sua rete di pluviometri; stiamo anche testando un network wireless di sensori che registrano la presenza di acqua a livello stradale quando si verifica un'alluvione. I nostri modelli predittivi comprendono anche dati ottenuti dai radar, che contengono informazioni sulla quantità d'acqua trasportata dalle nuvole che si dirigono verso la città e la velocità con cui sono mosse dal vento. Venti più deboli lasciano alle nuvole il tempo di scaricare grandi quantitativi d'acqua: questo produce molte delle inondazioni non collegate agli uragani ed era all'origine dell'inondazione provocata nel 2017 dal lento uragano Harvey.

Tutti questi dati sono sovrapposti a una carta geografica altimetrica ad alta risoluzione, costruita grazie al sistema di telerilevamento laser dello Houston-Galveston Area Council, che cattura ogni minima differenza di altitudine a livello del suolo. Il tutto è integrato con programmi di intelligenza artificiale che sfruttano tecniche dai nomi altisonanti quali *ensemble* di modelli di regressione, algoritmi di *deep learning* e spazi vettoriali di alte dimensioni. La cosa importante, tuttavia, è che riescono a combinare molto meglio tipi diversi di serie di dati di quanto non facessero i modelli ingegneristici e la matematica su cui era basato il nostro programma originale.

Il nostro sistema mostrerà i rischi dei diversi percorsi, la possibilità di restare intrappolati in determinati luoghi e i livelli più probabili a cui salirà l'acqua rispetto alle abitazioni

Abbiamo testato HARVEY offrendogli diverse combinazioni delle condizioni iniziali osservate prima degli uragani dal 2015 in poi, e chiedendogli poi di stimare gli allagamenti in vari luoghi della città. Le previsioni sfornate da HARVEY hanno mostrato un buon accordo con le osservazioni dal vivo eseguite durante gli eventi. Il programma dà il meglio di sé con le piogge particolarmente intense (precipitazioni di oltre 5 centrimetri all'ora che durano per diverse ore), e in luoghi in cui il drenaggio è scarso a causa delle esondazioni dei bayou e delle maree della baia. Per quanto riguarda gli eventi meno importanti, calibreremo HARVEY considerando un bacino idrico alla volta lungo un periodo di più anni, in modo da catturare i fattori locali e gli effetti più a lungo termine dei cambiamenti climatici.

Che cosa comporta tutto questo per Alice e Bob, i nostri preoccupati abitanti di Houston?

La nuova mappa che abbiamo prodotto offre loro livelli di rischio differenziati, perché presta maggior attenzione alla storia delle alluvioni avvenute vicino alla casa di Alice e all'altitudine del terreno intorno a quella di Bob. La differenza fondamentale è che anche se Bob e Alice abitassero a due isolati di distanza, anziché a due chilometri, sarebbero loro attribuiti livelli di rischio diversi. Poiché la distribuzione delle precipitazioni in città in ogni singolo evento è molto irregolare, utenti come Alice e Bob possono trovare stime molto diverse degli allagamenti delle strade nei pressi delle loro case, dei loro posti di lavoro e delle strade per raggiungerli. Il nostro sistema mostrerà agli utenti come loro i rischi relativi a ciascun percorso, la possibilità di restare intrappolati in determinati luoghi e i livelli più probabili a cui salirà l'acqua intorno alle case durante le piogge intense. HARVEY aiuterà l'amministrazione cittadina a pianificare in anticipo gli interventi di emergenza e le relative risorse, consentendo ai primi soccorritori (come i vigili del fuoco) di raggiunge più in fretta chi è nei guai. I progetti di mitigazione degli uragani possono essere situati nelle aree dove ce n'è più bisogno.

Al momento pensiamo di lanciare pubblicamente nel 2019 una versione beta di HARVEY progettata specificamente per i residenti del bacino del Brays Bayou, che è sempre duramente colpito. Questo corso d'acqua attraversa un quartiere chiamato Meyerland, i cui residenti sono stati più volte sorpresi dalle inondazioni negli ultimi cinque anni. Le loro case sono state distrutte, ricostruite e poi distrutte di nuovo. In molte occasioni la gente è rimasta bloccata nelle proprie abitazioni, a guardare il livello dell'acqua che saliva. Speriamo di poter avvertire queste persone meglio e con maggiore anticipo. Il nostro passo successivo sarà ampliare il sistema fino a comprendere tutta la città. La nostra squadra sta iniziando una collaborazione con la municipalità di Houston, il Kinder Institute for Urban Research e il Severe Storm Prediction, Education & Evacuation from Disasters (SSPEED) Center per testare e usare HARVEY in stadi successivi, fino ad arrivare a una copertura cittadina totale. Se il modello funziona per Houston, potrebbe poi essere adattato ad altre città di tutto il mondo che affrontano problemi analoghi per colpa dell'inclemenza del clima.

Secondo un convegno sugli uragani più gravi organizzato dallo SSPEED Center a Houston nel 2018, nella nostra regione i cambiamenti climatici globali intensificheranno le piogge: le masse d'aria stagnante saranno più frequenti, provocando di conseguenza più precipitazioni. Strumenti come HARVEY forniranno stime degli allagamenti alle scale necessarie per i pubblici ufficiali e i privati cittadini che cercano di pianificare le azioni in relazione alla maggiore intensità delle piogge croniche e dei deflussi d'acqua. Cosa ancora più importante, si tratta di strumenti che daranno alle persone che devono vivere sotto queste nuvole la possibilità di rispondere a una domanda urgente, che tocca la loro sicurezza e quella degli altri: devo restare o devo andarmene? ■

PER APPROFONDIRE

Engineering-Based Hurricane Risk Estimates and Comparison to Perceived Risks in Storm-Prone Areas. Duenas-Osorio L. e altri, in «Natural Hazards Review», Vol. 13, n. 1, pp. 45-56, febbraio 2012.

How Risk Perceptions Influence Evacuations from Hurricanes and Compliance with Government Directives. Stein R. e altri, in «Policy Studies Journal», Vol. 41, n. 2, pp. 319-342, maggio 2013.

Building and Validating Geographically Refined Hurricane Wind Risk Models for Residential Structures. Subramanian D. e altri, in «Natural Hazards Review», Vol. 15, n. 3, articolo n. 04014002, agosto 2014.

Efficient Resilience Assessment Framework for Electric Power Systems Affected by Hurricane Events. Mensah A.F. e Duenas-Osorio L., in «Journal of Structural Engineering», Vol. 142, n. 8, agosto 2016.

GENETICA

A scuola di CRISPR

Questa tecnica di editing genomico può essere usata con facilità anche da scienziati amatoriali? Una giornalista con una laurea in biologia ha provato a cimentarsi con CRISPR in laboratorio

di Anna Meldolesi

Non è mai troppo tardi per imparare a riscrivere un genoma, si potrebbe dire parafrasando la vecchia trasmissione televisiva con cui negli anni sessanta il maestro Manzi ha insegnato l'italiano agli italiani. Insomma eccomi qui, a scuola di CRISPR. Non ho davanti un kit-giocattolo ordinato *on line*, come quelli con cui si è già cimentato qualche collega giornalista in Italia e non solo. Ho la fortuna di partecipare a un corso a numero chiuso, organizzato dalla Società italiana di genetica agraria (SIGA) a Grugliasco, presso il Dipartimento di scienze agrarie, forestali e alimentari dell'Università di Torino. Dopo aver scritto tanto su CRISPR, sarò capace di «crispare»?

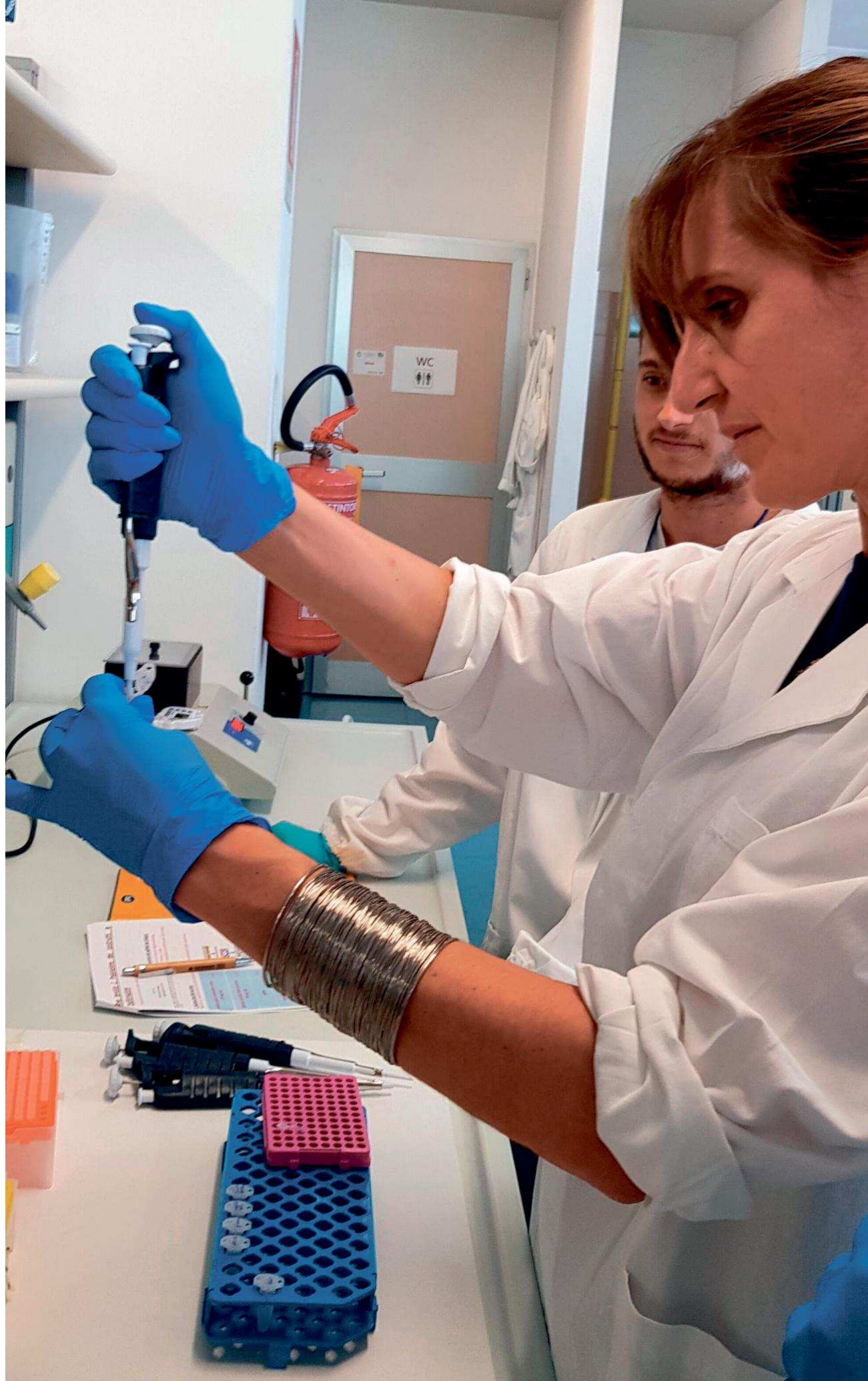
In azione. L'autrice durante le attività sperimentali dedicate all'uso della tecnica CRISPR in un apposito corso di quattro giorni.

IN BREVE

La tecnica di editing genomico CRISPR è economica e facile da usare, al punto che si sente dire che è alla portata anche di scienziati amatoriali, grazie pure a kit che è possibile acquistare on line.

Ma è davvero così? Basta comprare CRISPR su Internet e saperne di scienza, magari una laurea presa in gioventù, per editare con relativa facilità i genomi?

L'autrice dell'articolo si è cimentata in questo compito, grazie un apposito corso a numero chiuso organizzato dalla Società italiana di genetica agraria.

In quattro giorni ha tentato di editare il genoma di una pianta con l'aiuto di CRISPR e di altri strumenti necessari, disponibili agli scienziati di professione. Non è stato facile portare a termine la procedura e l'aiuto dei ricercatori è stato determinante.

Anna Meldolesi è una giornalista scientifica laureata in biologia. Il suo ultimo libro *E l'uomo creò l'uomo. CRISPR e la rivoluzione dell'editing genomico* (Bollati Boringhieri, 2017) è arrivato secondo al premio letterario Galileo 2018. Scrive per il «Corriere della Sera» e cura CRISPeR Mania, un blog dedicato agli sviluppi delle nuove biotecnologie.

Si dice che la nuova tecnica di *editing* genomico abbia democratizzato le nuove biotecnologie di precisione, perché è economica e facile da usare, alla portata di qualsiasi laboratorio. Qualcuno teme che manipolare il DNA sia diventato addirittura troppo semplice, e che prima o poi qualche biologo amatoriale combinerà un disastro. Il soprannome che è stato dato agli sperimentatori della domenica, in effetti, non è rassicurante. Li chiamano *biohacker*. Ma sono pochi, ben controllati dall'FBI, per lo più orientati a una cultura della trasparenza. E poi non è affatto detto che editare genomi in modo da ottenere un risultato di qualche valore sia così semplice come si dice in giro.

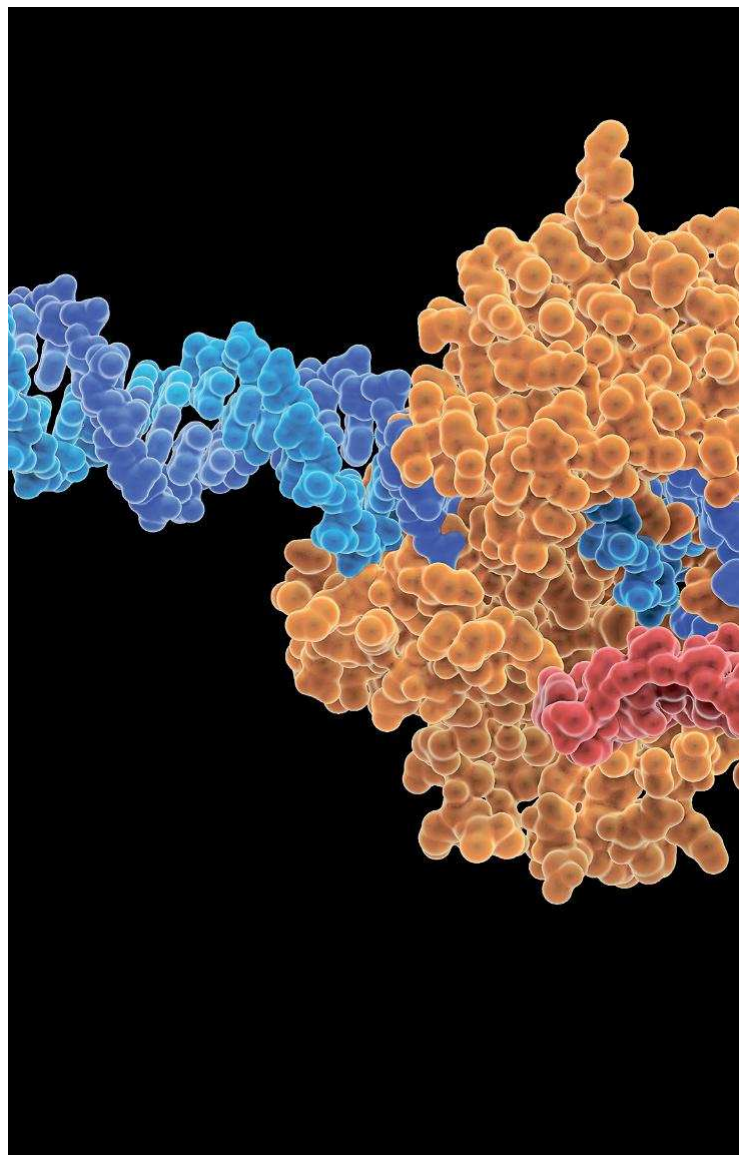
Io per esempio ho in tasca una vecchia laurea quinquennale in biologia con indirizzo biomolecolare, ma non mi illudo che usare CRISPR sarà un gioco da ragazzi. I miei compagni di classe sono 15 ricercatori (in gran parte donne) provenienti da tutta Italia, selezionati in base al curriculum. Siamo qui a imparare come si corregge il DNA di una specie vegetale in tre tappe, passando dai bit alle molecole fino alle piantine vere e proprie. Sono l'unica giornalista, e non impugno una pipetta da quando, vent'anni fa, mi sono laureata. Ma leggo tutto quello che esce su CRISPR, ho scritto un libro su questo tema e con il blog CRISPeR Mania continuo a seguire l'evoluzione della tecnica, tra controversie ed exploit. Partecipare al primo corso teorico-pratico sulla nuova frontiera delle biotecnologie organizzato nel nostro paese, uno dei primi in Europa, è un'occasione unica per capire quanto sia grande il mare tra il dire e il fare.

Carlos Clarivan/SPL/AGF

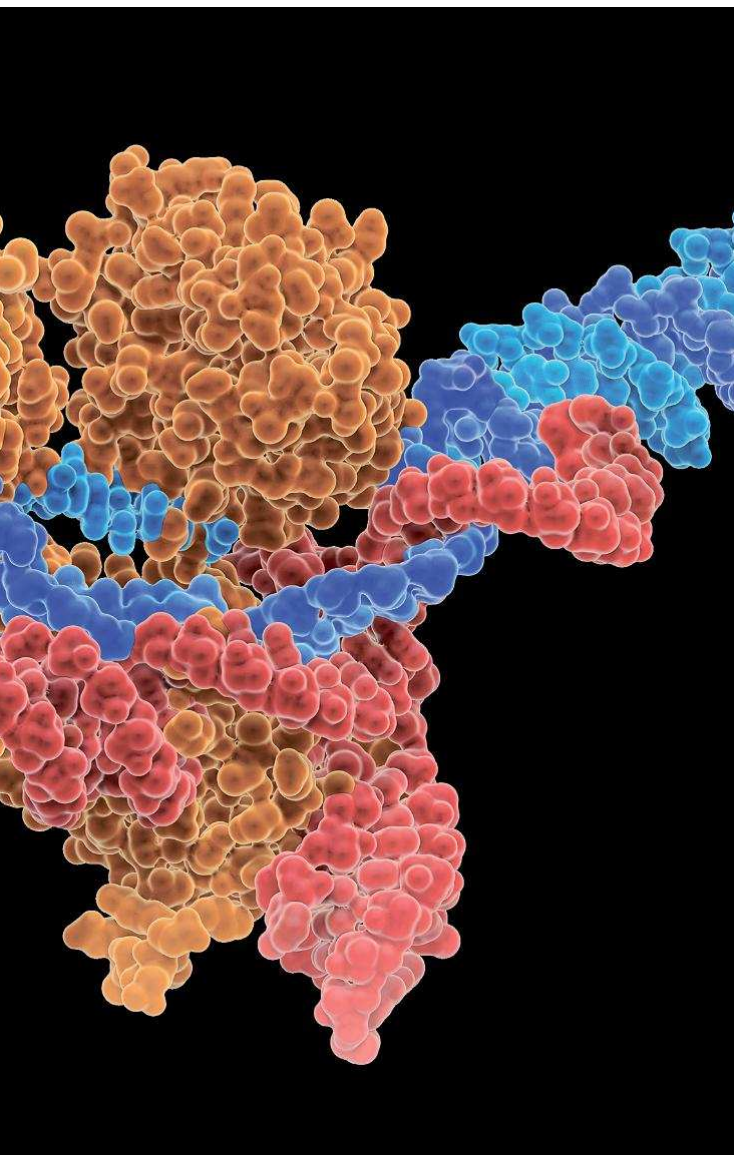
Nessun effetto speciale

A Grugliasco non siamo venuti a fare scienza spettacolo: niente yogurt fluorescenti, né cocktail al DNA di fragola, come in certi *happening* goliardici da *nerd*. Ogni partecipante può scegliersi un gene da inserire nel genoma di una pianta e poi viene guidato nel percorso per arrivare al risultato, passaggio dopo passaggio, dagli istruttori della SIGA. Ciascun esperimento ha un costo complessivo di circa 500 euro. Poco, ma non pochissimo. Perché è vero che i reagenti per crispare sono economici e sono messi a disposizione dei ricercatori di tutto il mondo secondo modalità *no profit*, ma questa è solo una fase del processo, e bisogna pur sempre disporre di un laboratorio con attrezzature professionali, inclusa la tecnica PCR per l'amplificazione a catena del DNA.

Si dice che modificando il patrimonio genetico degli organismi viventi gli scienziati giochino a fare Dio, ma è solo una frase a effetto. Dal Neolitico in poi l'agricoltura è sempre stata un'attività umana e terrena, in cui i nostri antenati cambiavano il genoma delle piante senza neppure saperlo. Le divinità sono impegnate in un altro campionato, come ha detto una volta uno dei pionieri di CRISPR, il genetista George Church, della Harvard University.

Non giocherò a fare Dio, dunque. Volendo pensare in grande, mi dico che al massimo proverò a emulare il lavoro di Norman Borlaug con gli strumenti del terzo millennio. Il mitico agronomo statunitense che nella seconda metà del secolo scorso ha innescato la Rivoluzione Verde, meritandosi il Nobel per la pace nel 1970, usava le tecniche di miglioramento genetico più vecchie del mondo: incrocio e selezione. Per raccogliere il suo testimone e soddisfare l'appetito crescente della popolazione globale in modo sostenibile, ora i genetisti vegetali possono contare anche sulla versatilità e sulla precisione di CRISPR. Il vantaggio è notevole, perché non sono più vincolati ad attingere alla variabilità genetica generata dalla lotteria delle mutazioni casuali. Possono produrre nuove varianti, in modo più mirato e sicuro che in passato. A seconda delle necessità si possono introdurre nuovi geni, con una sorta di ingegneria genetica 2.0 più controllabile di quella classica, oppure si possono correggere le singole lettere senza introdurre materiale genetico estraneo. Questa modalità si chiama editing proprio perché somiglia alla correzione dei refusi in un testo scritto al computer.

Non esiste un'indagine ufficiale su come si usa CRISPR oggi nei laboratori italiani di genetica agraria, quindi provo a farmi un'idea in base ai progetti dei miei compagni. Riguardano geni per la resistenza a parassiti e malattie, geni per migliorare l'assorbimen-

Come funziona. Riproduzione al computer della struttura del sistema CRISPR-Cas9 (*in arancione*) che usa una guida RNA (*in rosso*) per tagliare il DNA (*in blu*). Accanto, alcuni partecipanti al corso organizzato dalla Società italiana di genetica agraria.

Cortesia Società italiana di genetica agraria

to del fosforo dal suolo o il metabolismo dell'azoto, geni implicati nella crescita o nella domesticazione. Anche l'elenco delle specie scelte per la correzione genetica è variegato: si va dal mais al frumento, dal fagiolo alla patata, dalla vite al pomodoro.

Un editing egualitario

Quando tocca a me scegliere, consulto un organizzatore del corso, Emidio Albertini, dell'Università di Perugia, e decido di puntare il più in alto possibile. Scelgo *Apostart*, uno dei geni sospettati di svolgere un ruolo chiave in un fenomeno affascinante e potenzialmente rivoluzionario per i destini dell'agricoltura. L'apomissia, cioè la produzione asessuata dei semi. Se riuscissimo a far riprodurre così le piante di interesse commerciale, ottenendo semi che sono cloni della pianta madre, non solo si ridurrebbero tempi e costi per lo sviluppo e la produzione di nuove varietà, ma gli agricoltori potrebbero utilizzare i semi prodotti dalle proprie piante indefinitamente, senza penalizzazioni sul piano della resa. Oggi invece, se non si vogliono perdere i vantaggi conferiti dal vigore degli ibridi, è necessario rifornirsi ogni anno dalle ditte sementiere.

Sono decenni che un piccolo gruppo di specialisti cerca, tra alti e bassi, di decifrare la genetica dell'apomissia, chissà se nel prossimo futuro CRISPR imprimerà lo sprint finale a questo filone di ricerca. Per i paesi poveri sarebbe un'opportunità di sviluppo da cogliere al volo. C'è da augurarsi che con CRISPR la ricerca non sarà sottoposta a tutti gli oneri burocratici a cui deve sottostare quella con l'ingegneria genica classica. Altrimenti i ricercatori si troveranno impantanati nella palude della sovra-regolamentazione prima ancora di affrontare gli ostacoli tecnici. Nel momento in cui partecipo al corso non è ancora arrivata la sentenza della Corte di giustizia europea del 25 luglio 2018 secondo cui le piante mutate con CRISPR vanno normate come gli OGM. Perciò posso ancora sperare che le futuribili piantine apomittiche create con l'editing, dopo le prove in serra, potranno essere testate nei campi sperimentali senza opposizioni di natura politica.

Se c'è un progetto che potrebbe convincere chi diffida degli OGM in quanto simbolo dell'agricoltura intensiva, è proprio l'apomissia, con il suo potenziale egualitario. Ma per sognare è presto, il mio progetto è ancora solo un'idea abbozzata sulla carta. Senza contare il fatto che il comitato nazionale competente non ha ancora concesso alcuna autorizzazione per provare in campo le prime

piante editate con CRISPR. Il riso con i tempi di fioritura geneticamente rimodulati sviluppato all'Università degli Studi di Milano, per esempio, attende in serra da oltre due anni il via libera per la sperimentazione controllata all'aperto. Dunque i genetisti italiani aspettano e sperano, mentre si danno da fare per non restare indietro e si tengono aggiornati anche con il corso della SIGA.

Una certa esperienza

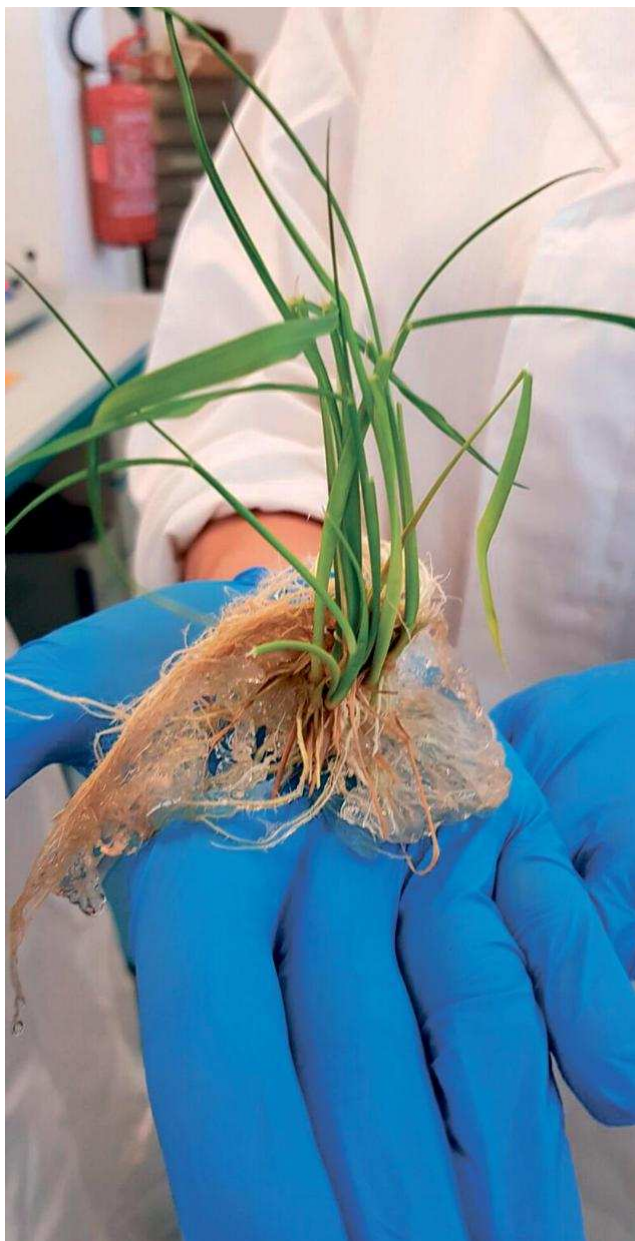
Il primo traguardo del mio esperimento è preparare il costrutto genico *in silico*. Insomma, progettarlo a tavolino con l'aiuto di *software* dedicati. Programmi e banche dati delle sequenze sono facilmente accessibili on line, ma per usarli bene ci vuole una certa esperienza nel campo della bioinformatica. È questo il primo scoglio su cui sono destinate a infrangersi le illusioni dei biotecnologi della domenica come me. In Europa, va detto, la biologia fai-da-te (*DIY biology*) è un fenomeno quasi inesistente. Negli Stati Uniti si parla di qualche centinaio di persone che fanno esperimenti per lo più in laboratori comunitari, pagando un abbonamento mensile o annuale per poter usare materiali e macchinari. I loro progetti devono essere approvati dal laboratorio e devono rispettare criteri basilari di biosicurezza.

Generalmente il livello scientifico delle ricerche DIY è medio-basso, quindi non ci si aspettano né grandi pericoli né grandi progressi da quella che è chiamata anche *garage biology* con un riferimento all'avventurosa giovinezza dell'informatica. Secondo un'indagine pubblicata sul tema, chi la pratica è un *nerd* in cerca di un passatempo intelligente o un ricercatore in vena di diversivi. Comunque se qualcuno volesse creare scompiglio non avrebbe certo bisogno di CRISPR. Il mondo è pieno di microrganismi pericolosi del tutto naturali. E volendo prendere di mira l'agricoltura sarebbe più facile hackerare i sistemi informatici che regolano l'irrigazione dei campi, come ha ipotizzato un articolo di «Foreign Affairs», che fare danni armeggiando con i genomi.

Fare vera scienza con CRISPR richiede come minimo una laurea magistrale al passo con i tempi (la mia è troppo vecchia), meglio ancora un PhD. In teoria devo solo montare i pezzi come se fossero mattoncini del Lego, ma in pratica non smanetto abbastanza bene al computer, dunque ho ripetutamente bisogno delle dritte della squadra dei docenti: Alberto Acquadro, Cinzia Comino e Andrea Moglia, dell'Università di Torino, e Fabio Fornara, dell'Università di Milano. Il risultato finale deve essere un anellino di DNA (plasmide) contenente la guida (gRNA o RNA guida) per trovare il gene bersaglio con il suo promotore, il gene che codifica per le forbici molecolari (l'enzima Cas9) sotto il controllo di un altro promotore, un gene marcatore per verificare se la trasformazione è andata a buon fine, più altri elementi di contorno.

A lezione in gruppo. L'aula dove si sono svolte le lezioni e il laboratorio delle sperimentazioni con tutti i partecipanti. Nella pagina a fronte, una delle piante che sono state editate con CRISPR.

Comincio inserendo l'informazione sul gene da modificare, *Apostart*. Poi cerco nelle banche dati la specie che intendo modificare. Se fossi così ambiziosa da voler sfamare subito il mondo potrei puntare sul riso, ma è più saggio cominciare con la pianta modello dei genetisti, *Arabidopsis thaliana*. Aggiungendo anche il sito di ancoraggio di cui CRISPR ha bisogno per legarsi al DNA, il software propone una serie di opzioni tra cui scegliere il proprio RNA guida. Un punteggio assegnato automaticamente aiuta a individuare quello che ha meno probabilità di far tagliare il genoma in

Cortesia Società italiana di genetica agraria (*tutte le foto in questa pagina e nella pagina a fronte*)

punti diversi dal bersaglio indicato (*off target*). Quando ci saranno le piantine trasformate e rigenerate, si potrà controllare con una serie di test se il DNA è stato corretto nel modo desiderato. Ma prima di arrivare a questo punto c'è ancora molto lavoro da fare.

Una volta scelti e sistemati tutti i pezzi del costrutto, adattandoli alla stessa grammatica molecolare, basta un click per ottenere un protocollo sperimentale su misura. È così che ricevo le mie istruzioni *ad hoc* su quali ingredienti, in che quantità e in quale ordine usare, per passare dall'aula di informatica al laboratorio, ovvero dalla progettazione in silico alla realizzazione *in vitro* del costrutto per l'editing genomico. Queste prime attività di biologia «bagnata» sono piuttosto facili per chi ha già acquisito un po' di manualità. Non per me. Pipettare non è come andare in bicicletta, mi sono scordata come si fa a farlo bene, e il tremore delle mani è una delle ragioni che tanti anni fa mi hanno convinto a scegliere di raccontare la scienza anziché farla. I miei compagni di corso invece hanno dimestichezza con i compiti di questa fase: mescolano i reagenti, portano a volume, amplificano il DNA. Attività di laboratorio standard. Poi però le cose si complicano nuovamente.

Mentre le tecnologie per il copia-e-incolla del DNA hanno fatto passi da gigante, i sistemi per veicolarle nelle cellule e coltivare queste ultime rigenerando piante intere sono rimasti piuttosto inefficienti e alcune specie vegetali sono considerate ancora recalcitranti. Qui a Grugliasco sono illustrate le elaborate procedure ottimizzate per riso e pomodoro sfruttando il più classico dei vettori, il batterio *Agrobacterium tumefaciens*. Un'occasione in più per pensare a quanto le biotecnologie debbano essere grate al mondo microbico. I batteri ci hanno regalato gli enzimi di restrizione, che riconoscono e tagliano specifiche sequenze di DNA, per la prima rivoluzione biotecnologica, e ora anche il sistema CRISPR, la cui attività si basa su una proteina (Cas9) capace di tagliare il DNA che in origine serviva ai batteri stessi per difendersi dai virus.

Per fare tutto in tempo reale impiegheremmo settimane, ma il corso dura solo quattro giorni. Perciò, alla fine di ogni passaggio gli insegnanti di CRISPR consegnano ai corsisti il materiale bello e pronto per la fase successiva. Procediamo come nelle trasmissioni di cucina in cui si prepara l'impasto mentre la torta cuoce già in forno. Dalla ricetta alla tavola. Anzi dal protocollo sperimentale al terreno di coltura. L'innovazione di CRISPR è servita.

Danno di immagine

Editare cellule per la ricerca biomedica, anziché riso o pomodori, non è certo più facile. Ci ha provato un giornalista scientifico di talento come Jon Cohen, con l'aiuto di un amico ricercatore. Anche lui ha puntato in alto: ha tentato di mettere fuori uso un gene immunitario, con un esperimento che in teoria avrebbe dovuto accrescere le conoscenze utili a sbarrare la strada al virus Zika. Per capire com'è andata a finire basta leggere il titolo dell'articolo che è uscito su «Science» a novembre 2016: *Uno dei nostri reporter ha provato a usare CRISPR. Ha fallito miseramente*. La morale della favola è che CRISPR è facile, ma solo per chi si muove già bene tra provette e programmi di bioinformatica.

I «DIY CRISPR kit» che sono venduti on line sono solo una pallidissima imitazione di quello che fanno i ricercatori di professione. Per 159 dollari si compra l'illusione di saper crispare, svolgendo uno pseudo-esperimento che si basa sul fenomeno più facile da ottenere e dimostrare: la resistenza agli antibiotici. Ma di batteri resistenti ce ne sono già fin troppi in circolazione, a causa del cattivo uso dei farmaci, non ha davvero senso scomodare CRISPR a questo scopo, alimentando paure infondate nell'opinione pubblica.

Per quanto il rischio sia remoto, i kit fai-da-te rappresentano un danno all'immagine di una tecnologia seria e molto promettente. Quindi se le autorità statunitensi ne vietassero la vendita e quelle europee ne bloccassero l'importazione farebbero solo un favore a chi lavora davvero con CRISPR, come i miei compagni di corso. E anche a chi, come me, cerca di raccontare agli appassionati di scienza la posta in gioco della rivoluzione di CRISPR. ■

PER APPROFONDIRE

Seven Myths & Realities about Do-It-Yourself Biology. Wilson Center, 2013

Considerazioni riguardo la tecnica dell'editing genomico per il miglioramento genetico delle colture agrarie, Società italiana di genetica agraria e Società italiana di biologia vegetale, 2016. **http://www.geneticagraria.it/attachment/SocietaScuolaRicerca/NBT_SIBV-SIGA.pdf.**

Il blog dell'autrice CRISPeR MANIA, notizie e opinioni dalla frontiera dell'editing genomico: **https://crispr.blog**.

Le interazioni fra le termiti e la vegetazione potrebbero spiegare il mistero di schemi diffusi in tutto il mondo

di Lisa Margonelli

Le termiti e i cerchi delle fate

Al ritorno dall'Australia mi chiesi che cosa stesse davvero succedendo in una grande miniera di bauxite di cui avevo sentito parlare, dove le termiti avevano riqualificato il terreno. Mi chiesi se il fatto che questi insetti stessero fertilizzando il suolo e riciclando l'erba fosse davvero la fine della storia. Avevo l'impressione che tra animaletti che rilasciano nella cacca qualche molecola di azoto in più e la creazione di una foresta nuova di zecca il salto fosse un po' troppo grande. Che cosa stavano facendo le termiti là sotto?

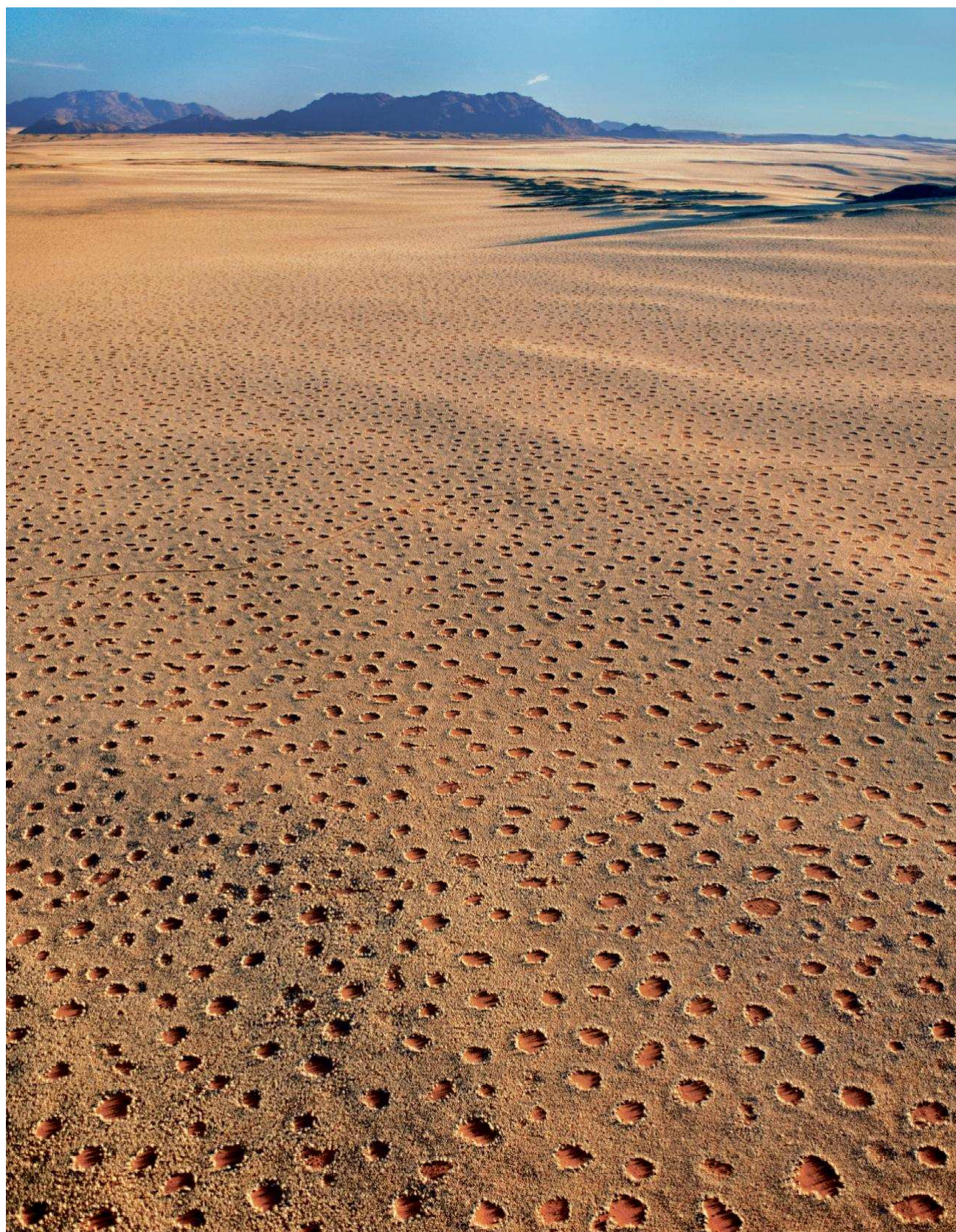
Cominciai a spulciare nel mio archivio in cerca di nomi di studiosi di paesaggi, così arrivai a una matematica di nome Corina Tarnita e a un ecologo di nome Rob Pringle. Quando la contattai, Corina era appena arrivata a Princeton da Harvard e, con Rob, aveva iniziato a usare modelli matematici per studiare il comportamento delle termiti nelle zone aride del Kenya. Il caso volle che avessi già intervistato Rob nel 2010, quando era stato tra gli autori di un articolo sul ruolo delle termiti negli ecosistemi della savana africana in cui vivono elefanti e giraffe.

Presi il treno per Princeton per incontrarli a inizio 2014. All'epoca mi interessavo di termiti da sei anni e avevo quasi rinunciato alle due idee che mi avevano motivato inizialmente: capire la relazione tra cambiamenti locali ed effetti globali (il concetto «dal globale al locale» che assilla i teorici della complessità) e lo sviluppo di tecnologie con il potenziale di «salvare il mondo». Obiettivi che invece, almeno in parte, sono stati poi raggiunti dai gruppi di Corina e di Rob, grazie ai modelli. Come bonus, questi ricercatori potrebbero addirittura aver risolto il mistero dei cerchi delle fate.

Quando arrivai a Princeton, un misto di vecchi palazzi di mattoni logorati dal tempo ed edifici cautamente futuristici di ferro e acciaio, Corina stava facendo lezione, così cercai Rob. Quando gli avevo parlato al telefono, in precedenza, cercava di capire gli ecosistemi usando le lucertole. Questa era la tecnica: disegnava una mappa di una parte del territorio, la divideva in un reticolo e contava le lucertole, usate come specie indicatrice. Se c'erano lucertole c'erano insetti, se c'erano insetti c'erano piante e se c'erano piante doveva esserci acqua. Per una coincidenza, i luoghi con abbastanza vegetazione da attirare un sacco di lucertole erano anche i preferiti dagli elefanti. E gli elefanti erano, in un certo senso, il punto cruciale di questi studi: tutti vogliono che ci siano più elefanti.

Nella savana del Kenya, relativamente arida, Rob aveva trovato nei suoi lotti di terreno tra 300 e 1100 gechi, ma c'erano due luoghi in cui il numero esplodeva: nei recinti di bestiame abbandonati e pieni di letame e sulle montagnole dei nidi delle termiti. Il legame dei gechi con il letame era ovvio, perché quest'ultimo è un ottimo fertilizzante per piante che attirano gli insetti, ma quello con i nidi delle termiti molto meno.

In quella zona del Kenya le termiti coltivatrici di funghi del ge-

Frans Lanting

Cerchi delle fate alla NamibRand Nature Reserve in Namibia.

nere *Odontotermes* costruiscono la maggior parte del nido sottoterra. Di conseguenza il terreno non somiglia a quel succedersi di colonne di fango tipico di altre parti dell'Africa, ma più a un paesaggio colpito dalla varicella, con tumuli in ogni direzione a una distanza variabile tra 20 e 50 metri gli uni dagli altri. Più Rob si avvicinava al centro di ogni montagnola, maggiore il numero di gechi che trovava. Cominciò poi a studiare la vegetazione erbosa della savana e le acacie: emerse uno schema simile. Era come se le termiti, dal sottosuolo, avessero organizzato il paesaggio in una grande scacchiera della fertilità. «Le termiti stanno involontariamente prendendo il controllo della situazione senza uscire in superficie», aveva commentato quando lo avevo intervistato nel 2010.

In parte, l'influenza delle termiti ha a che fare con le sostanze nutritive: Dan Doak e Kena Fox-Dobbs, fra gli altri, hanno scoperto che, nei tumuli, il terreno è molto più ricco di azoto e fosforo rispetto alle zone circostanti; come risultato, non solo alberi ed erba sono più abbondanti, ma contengono nelle foglie più azoto, che le rende più nutrienti e, probabilmente, anche più saporite. Le termiti, inoltre, spostano i grani di sabbia, modificando il comportamento dell'acqua sui tumuli. Chiesi a Rob se le termiti stessero «coltivando» la terra per avere più erba da mangiare. Mi rispose che certo avevano a cuore i loro funghi sotterranei, ma la dinamica di ciò che accadeva in superficie non era chiara. Poteva trattarsi di una serie di processi di retroazione grazie a cui tutti traevano beneficio. Uno era il fatto che, attorno ai nidi, il terreno tratteneva l'acqua in modo diverso, ma i ricercatori non erano riusciti a capire come. «Le termiti sono molto importanti per la regolazione dei flussi idrici. Ma sono una scatola nera».

La prima volta in cui sentii Rob usare l'espressione «scatola nera» immaginai si trattasse di una metafora, non di un concetto ingegneristico. Ora però, mentre leggevo i miei vecchi appunti, mi chiesi che cosa avesse voluto dire davvero: pensava all'ingegneria mentre cercava di rispondere a una domanda in ambito ecologico, o anche lui aveva parlato di scatola nera solo in senso metaforico?

La cosa che più infastidiva Rob, nella storia delle termiti, era lo schema sul terreno. Era come se le termiti costruissero un reticolo che trasformava una pianura monotona in una serie di zone calde. C'era qualcosa, dietro l'organizzazione dello spazio, che rendeva l'intero sistema più produttivo. Con l'avvento di tecniche di rilevamento come il LIDAR, che sfrutta i laser per costruire immagini della superficie terrestre, questi schemi saltavano fuori da tutte le parti. Le cose che Rob non sapeva erano molte, e questo lo irritava: «Non posso fare a meno di notare questi schemi ogni volta che salgo su un piccolo aeroplano o guardo Google Earth». Lo capivo bene, perché li avevo visti anch'io. Quando era ad Harvard, Rob aveva condiviso il problema e la sua irritazione con Corina.

Sapevo che Rob aveva uno spiccato senso dell'assurdo perché on line avevo trovato una foto in cui indossava un abito scuro mentre lottava con un metro a nastro vicino a un recinto elettrificato. Quando lo incontrai nel suo ufficio, aveva indosso jeans e stivali da cowboy: un bel contrasto con i vecchi palazzi di Princeton.

Corina arrivò da lezione negli uffici disadorni dei professori con un vestito sgargiante e stivali alti, allo stesso tempo composta e alla moda. Ha un'aria intellettuale: recepisce i concetti, li rifrange attraverso il prisma della matematica e li vede sotto una luce nuova.

Corina è cresciuta in una fattoria in Romania ed è stata affascinata dalla matematica fin da giovane; ha vinto molti premi prima di andare a studiare ad Harvard. Dopo la laurea, iniziò un master lavorando su una cosa che si chiama geometria degli spazi multidimensionali, per poi passare a un certo punto alla biologia matematica, dove le questioni erano più concrete e anche più caotiche.

Cominciò a interessarsi al problema della cooperazione, e nel 2010, alla fine del dottorato, pubblicò insieme al biologo matematico Martin Nowak e all'entomologo E.O. Wilson un articolo in cui riesaminavano una teoria sull'evoluzione degli insetti sociali ormai consolidata. Corina aveva trascorso un anno rifacendo i calcoli alla base della teoria, per scoprire che il fatto di essere imparentati non è sufficiente, da solo, a far funzionare la cooperazione tra questi insetti. Quando una formica regina generava figlie che restavano ad accudire la nidiata il tasso di sopravvivenza di quest'ultima aumentava: la cooperazione produceva più parenti stretti.

Nel 2013 Corina si recò insieme a Rob al Mpala Research Center, in Kenya. Qui, anziché limitarsi a lavorare al computer costruendo modelli di competizione e cooperazione, poté agire direttamente su termiti di nidi diversi per vedere come combattevano quando erano messe insieme. Inizialmente il terreno pianeggiante ed erboso che lei e Rob stavano studiando sembrava tutto uguale, e Corina faticava a distinguere un nido da un altro. Via via che si abituò a individuare gli schemi ripetuti, però, cominciò ad avere una sensazione strana. «Sul campo nascono milioni di domande nuove. Mi stavo accorgendo che c'erano molti più schemi rispetto a quelli dei tumuli delle termiti. Avevo la sensazione che ce ne fosse uno in particolare, ma non riuscivo a capire quale».

Un pomeriggio, dopo che da tre settimane lavoravano alla loro proposta di finanziamento per la National Science Foundation, Corina e Rob fecero un giro. Costeggiarono un campo che era stato bruciato: erano scomparsi tutti gli steli dell'erba ed erano rimasti solo ciuffi di radici. A Corina sembrò di aver visto qualcosa e chiese di poter salire sul tetto della Range Rover. Ed ecco che, tra le stoppie bruciacchiate, finalmente li vide: due schemi distinti che interagivano fra loro. Il primo era lo schema a *pois* definito dai nidi delle termiti, ma le sembrò di distinguerne un secondo, a macchia di leopardo, nella vegetazione tra un nido e l'altro.

Le macchie di leopardo piacciono ai biologi matematici perché sono una forma naturale dietro cui c'è una teoria. Si tratta dei *pattern* (schemi) di Turing, un concetto teorico proposto per la prima volta nel 1952 dal matematico britannico Alan Turing e poi di-

Lisa Margonelli è vicedirettore della rivista «Zocalo Public Square» della Arizona State University. Ha scritto il pluripremiato *Oil on the Brain: Petroleum's Long, Strange Trip to Your Tank* (Random House, 2007).

IN BREVE

Le termiti sono fondamentali per la fertilità delle praterie aride di tutto il mondo. I loro nidi supportano una vegetazione erbacea ricca e nutriente, molti insetti, gechi e persino elefanti.

Rob Pringle e Corina Tarnita, due scienziati della Princeton University, stanno usando la matematica applicata all'ecologia per costruire modelli dell'impatto delle termiti.

Le termiti influenzano i paesaggi su vasta scala, aumentano la resilienza alla siccità e, tra l'altro, hanno un ruolo nella formazione dei cosiddetti cerchi delle fate.

mostrato esistere in sistemi biologici. Se avete visto un leopardo, un pesce zebra, una zebra, una conchiglia o un camaleonte, avete osservato dei pattern di Turing, anche chiamati pattern reazione-diffusione o scala-dipendenti. Sono componenti essenziali dell'organizzazione del mondo e intervengono in fenomeni tanto diversi come la formazione di muffe negli scarichi dei lavandini o il modo in cui il cervello di un coniglio percepisce gli odori.

Quando Corina disse a Rob di aver notato uno schema a macchia di leopardo, lui le rispose con scetticismo che non erano altro che mucchietti d'erba. Lei però continuava a insistere, così Rob scattò alcune foto. Tempo dopo mandarono studenti a fare altre fotografie con un treppiede da dieci metri. Quando esaminarono le immagini fu subito chiaro che su quel terreno si ripeteva uno schema regolare. Rob capì subito di essersi sbagliato: semplicemente, sapeva troppe cose sulle piante per riuscire ad andare oltre ciò che già conosceva. «Essere sul campo con Corina è un'esperienza straordinaria», ha dichiarato. «Non c'è da stupirsi, ma lei non aveva le mie stesse idee sulla competizione fra le radici».

Corina, dal canto suo, era al settimo cielo. «Prima che Rob mi portasse in Africa ero una biologa teorica. Oggi, quasi non voglio più lavorare su sistemi che non posso osservare o manipolare. È stato un cambiamento enorme».

Quel momento era l'inizio del lavoro da fare insieme al suo gruppo di ricerca: costruire un modello, verificare un'ipotesi e usarla per prevedere l'aspetto che avrebbero avuto in natura i meccanismi di interazione fra schemi diversi. «Prima del modello ci deve essere un'intuizione su quelle che potrebbero essere le regole degli schemi», mi ha raccontato più tardi. «Costruisco uno scheletro dell'idea e poi aggiungo un sacco di dettagli sul funzionamento delle termiti e delle piante. È un lavoro da investigatore».

Se avete visto un leopardo, un pesce zebra, una zebra, una conchiglia o un camaleonte, avete osservato dei pattern di Turing

Insieme a Juan Bonachela, biologo teorico specializzato in fisica statistica, e a Efrat Sheffer, biologa di Gerusalemme che studia il rapporto tra singole piante e loro ecosistema, Corina costruì un modello; come *proxy* del modo in cui i termitai organizzano il paesaggio usò un semplice reticolo di esagoni. Le termiti lasciano il nido per cercare il cibo muovendosi in cerchi sempre più ampi; nel corso dei decenni, via via che il territorio si riempie di tumuli, le aree di caccia dei vari nidi cominciano a sovrapporsi. Quando tutti i termitai contengono circa lo stesso numero di termiti, cominciano a disporsi nello spazio in modo regolare.

Quando il raggio del cerchio in cui si muovono le termiti in cerca di cibo tocca quello del nido vicino si forma un bordo. Non è un vero confine, e non è visibile in superficie, ma esiste. Forse è prodotto dai combattimenti feroci a cui assistette la ricercatrice Jessica Castillo-Vardaro quando mise insieme termiti di due nidi diversi, o dal fatto che le termiti evitano gli insetti che non hanno lo stesso odore delle loro parenti strette. Se i tumuli sono distribuiti sul terreno in modo regolare, la maggior parte dei termitai ha sei vicini. Alla fine i nidi sembrano un mosaico di esagoni, schema che massimizza la distanza tra ogni tumulo. La cosa ha un senso: sono molte le creature il cui territorio di caccia si auto-organizza in forma di esagono, tra cui il lupo, il piro-piro occidentale e alcuni pesci.

Successivamente il gruppo di Corina creò un modello per gli schemi vegetazionali. Il concetto di base dei pattern di Turing è l'esistenza di due diversi meccanismi di retroazione, o *feedback*. Sulle brevi distanze, la crescita è incoraggiata (attivata), mentre sulle lunghe distanze è scoraggiata (inibita). Per esempio, piante vicine possono aiutarsi a vicenda assorbendo l'acqua piovana con maggiore efficienza, creando ciuffi di vegetazione; però via via che la distanza aumenta i ciuffi cominciano a competere per l'acqua, smettono di crescere e alla fine non resta che la nuda terra.

Se in un modello attribuiamo all'attivatore e all'inibitore quattro parametri diversi (velocità di diffusione, intensità e così via) e modellizziamo la loro interazione, nel tempo formeranno un insieme di schemi distintivo. I modelli con un attivatore forte, per esempio, risulteranno in grossi cerchi, quelli con un inibitore forte in una serie di piccoli pois. Agendo allo stesso tempo anche sui parametri per la diffusione, ecco che emergono schemi simili al carapace di una tartaruga, a una serie di ciambelle, a un'alternanza di pieni e vuoti o a un labirinto. Tutti questi schemi teorici ricordano cose che abbiamo visto nella vita reale, per esempio vivai di cozze, barriere coralline, funghi. I biologi hanno speculato che gli attivatori di un meccanismo di retroazione scala-dipendente potrebbero essere le cose più disparate: acqua, determinati ormoni od organismi che si aiutano a vicenda; gli inibitori, per contro, potrebbero essere siccità, altri ormoni o predatori.

Usando una miscela di attivatori e inibitori appropriati per la vegetazione del Kenya, Corina e Juan hanno costruito un modello matematico da cui sono emersi gli schemi di un meccanismo di retroazione scala-dipendente. Intervenendo solo sui parametri relativi all'erba, sono riusciti a limitare l'acqua e a trasformare i ciuffi d'erba da grosse macchie di vegetazione a un labirinto e, infine, a un deserto, un po' quello che si può vedere nelle foto. «Ci siamo detti, "OK, questo è un sistema reazione-diffusione"», ha commentato Corina a proposito degli schemi vegetazionali. «Possiamo associarlo agli schemi delle termiti?». E così ha messo insieme i termitai auto-organizzati e il modello di retroazione scala-dipendente costruito per la vegetazione. Come risultato, non è emersa una ripetizione omogenea di puntini in mezzo agli esagoni (per quanto riguarda i tumuli), ma nemmeno uno schema vegetazionale a macchia di leopardo, anzi. Il motivo maculato, piuttosto, si è adeguato al reticolo di esagoni: nella simulazione, la vegetazione era fiorente vicino ai termitai ricchi di risorse posti al centro degli esagoni e diminuiva procedendo verso i bordi.

Corina fece interagire i due modelli più volte, con valori diversi per la quantità di precipitazioni, stampò alcune immagini e le mostrò a Rob. Le immagini avevano un aspetto simile agli schemi dei tipici tessuti africani: puntini distanziati con regolarità circondati da aloni, con sullo sfondo disegni che ricordavano il carapace di una tartaruga. I puntini erano i termitai e il carapace lo schema vegetazionale a macchia di leopardo. Quando Corina e Rob confrontarono i risultati grafici dei loro modelli con le immagini satellitari dei termitai africani scoprirono che erano molto simili. Nel modello potevano addirittura ingrandire l'immagine del carapace e vedere le forme dei ciuffi d'erba, che erano le stesse visibili nelle foto. In precedenza questi schemi non erano saltati all'occhio. «È stata la convergenza tra previsioni del modello e dati che mi ha fatto credere di essere sulla buona strada», ha concluso Rob.

Per Corina il momento più eccitante fu la scoperta che i due diversi schemi stavano interagendo su scale multiple, influenzandosi reciprocamente. Il locale si stava collegando al globale, addirittura facendo bella mostra di sé sulle mappe satellitari. «Il massimo della felicità, per me, è quando i modelli possono essere testati e si scopre un ottimo accordo con i dati come in questo caso», ha dichiarato la ricercatrice, ovviamente entusiasta.

Per quanto mi riguarda, la matematica di Corina e del suo gruppo è riuscita a spiegare il senso di disturbo che provavo quando, da un aeroplano, guardavo in giù e osservavo i paesaggi di Namibia e Australia. Quella sensazione di star quasi ammirando i disegni regolari e ripetuti di un tappeto persiano era corretta, e ora che potevo vedere i disegni che emergevano dalle simulazioni mi misi a riflettere su come l'intuizione di Corina si era combinata con la potenza della matematica per rivelare qualcosa di nuovo. All'inizio del Novecento lo studioso di termiti Eugène Marais aveva scritto che ci sarebbe stato bisogno di un «nuovo alfabeto» per vedere le termiti come sono realmente. L'alfabeto, forse, era questo.

Grazie ai due modelli, Corina aveva intuito anche qualcos'altro, con implicazioni ancora più grandi. Giocherellando con precipitazioni e acqua caduta sui termitai, aveva scoperto che l'erba, quando era associata a un nido, poteva sopravvivere anche con pochissima acqua, molta meno di quanto ci si aspettasse. In parole povere, i tumuli dei termitai rendevano il paesaggio molto più resistente alla siccità.

Noi umani ignoriamo i rimescolamenti dei mondi più piccoli e più grandi del nostro, che non possiamo vedere

Questa osservazione aveva una ricaduta pratica. I biologi avevano usato gli schemi dei labirinti e delle macchie per prevedere che alcuni paesaggi aridi, prima di trasformarsi in un deserto (prospettiva temibile sia in Africa che in Australia), si ricoprivano di chiazze irregolari. Questi modelli teorici della metà degli anni duemila prevedevano che mentre queste zone aride andavano incontro al disastro non si sarebbero prosciugate gradualmente: al contrario, la vegetazione erbosa sarebbe passata da uno schema a labirinto a uno a macchie per poi precipitare catastroficamente verso la trasformazione in deserto (la cosiddetta transizione critica). Tornare indietro sarebbe stato molto difficile, se non impossibile.

Quando però Corina, nel suo modello, intervenne sui livelli di acqua piovana per produrre il labirinto di piante che può precedere la catastrofe, scoprì che in presenza di termitai la catastrofe avviene molto più lentamente: i valori, anziché precipitare, decrescono con un andamento a scalini. Di conseguenza, nel modello, i luoghi con termitai avevano una probabilità molto inferiore di desertificarsi. Se anche fosse successo, per di più, avevano maggiori probabilità di ristabilirsi con la stagione delle piogge successiva. Fino a quando le termiti erano presenti, l'erba sarebbe spuntata prima sui tumuli dei nidi e poi in altri punti, seguendo schemi precisi. Sembrava proprio che le termiti facessero aumentare la solidità del luogo, oltre a essere una casa per gechi e cibo per gli elefanti. Se si considera che le zone aride ricoprono il 40 per cento della superficie terrestre e che i cambiamenti climatici stanno ridistribuendo le precipitazioni in tutto il mondo, le termiti potrebbero davvero star salvando il pianeta. Per una volta, senza esagerazioni.

Il modello era promettente, ma i modelli non sono il mondo reale. Il gruppo doveva ora testare le previsioni sul campo, con esperimenti in Kenya in cui assicurare che su alcuni tumuli ci fosse più acqua piovana e su altri meno del normale. Rob, Corina e colleghi speravano così di vedere se gli schemi della vegetazione sarebbero cambiati secondo le previsioni. Per riuscirci, avevano bisogno di capire come bloccare l'apporto idrico in alcuni appezzamenti e incrementarlo in altri. Kelly Caylor e Adam Wolf, anche loro di Princeton, stavano facendo qualcosa di simile nell'ampia area forestale di Pine Barrens, nello Stato del New Jersey (per il resto completamente urbanizzato), e mi dissero che potevo accompagnare Rob e Corina a visitare le loro strutture.

Era un freddo giorno di novembre, e Pine Barrens tenne fede al proprio nome (Pinete Desolate): chilometri e chilometri di alti pini di colore scuro, trasandati come possono esserlo a fine autunno, e relativamente liberi da sottobosco. I ricercatori avevano costruito piccoli ripari con listelli di legno da 10 × 5 centimetri comprati in un negozio per fai-da-te. Così erano riusciti a impedire alla pioggia di cadere su alcuni appezzamenti mentre, allo stesso tempo, ne schizzava altri con dell'acqua in più. Sotto i pini c'era poca luce e faceva più freddo: avevo addosso solo una felpa e mi ero ingobbita con la speranza di conservare calore.

Secondo Rob, gli elefanti non avrebbero apprezzato le casette che impedivano l'accesso a cespugli dall'aspetto delizioso nel bel mezzo dell'arida savana. «Per me gli elefanti sono un rischio stocastico generalizzato, ma certo saranno attirati dall'acqua». Dubitava di riuscire a costruire qualcosa di abbastanza resistente da arginarli. Senza contare che sono astuti: anche una recinzione elettrica avrebbe avuto controindicazioni. «Se mettiamo un recinto alto due metri, gli elefanti ci giocheranno e faranno pasticci, mentre le giraffe ci finiranno dentro perché non prestano attenzione». Era divertente starsene lì a tremare in mezzo ai pini del New Jersey parlando di campi pieni di giraffe distratte.

Sulla strada di ritorno per Princeton, i ricercatori menzionarono di aver parlato con colleghi che, in modo del tutto informale, mettevano in discussione il fatto che gli schemi fossero una conseguenza delle termiti. Secondo Rob, a essere scettici almeno in parte erano scienziati non familiari con i sistemi che si auto-organizzano; era possibile che questi ricercatori pensassero che una simile organizzazione di schemi su vasta scala implicasse la presenza di un «architetto». Inoltre alcuni ecologi ritenevano che se la competizione fra colonie di termiti era abbastanza accesa da provocare questi schemi elaborati, era anche probabile che portasse al collasso le risorse su cui si basava. L'idea che le termiti potessero competere così tanto da creare gli schemi e, allo stesso tempo, aiutare ad abbassare le probabilità di collasso dell'ecosistema era, con le parole di Rob, «uno scoglio difficile da superare».

Tornati nel suo ufficio, Corina ci spiegò che il suo prossimo piano consisteva nel mettere il gruppo a lavorare su un modello per termiti e vegetazione molto più dettagliato, con cui partecipare alle Olimpiadi del dibattito sugli schemi: i cerchi delle fate. Si tratta di misteriose zone circolari prive di vegetazione, in genere circondate dall'erba, che si trovano nel nord della Namibia e in Australia. Nelle foto aeree hanno l'aspetto di impronte di elefante di colore rosa, regolarmente distanziate, di diametro variabile tra 2,5 e 30 metri. I cerchi delle fate sono stati oggetto di accesi dibattiti,

Termite soldato (*Odontotermes montanus*) su un pezzo di fungo bianco coltivato a scopo alimentare, appena estratta dal suo nido.

Robert M. Pringle Princeton University

con alcuni scienziati che li ritenevano frutto dell'intervento delle termiti e altri che li imputavano invece a uno schema vegetazionale. Per quanto siano stati oggetto di ricerca fin dagli anni settanta, l'interesse nei loro confronti si è impennato nel 2012 e nel 2016, quando le riviste scientifiche sono state investite da una piccola ondata di articoli che attribuivano i cerchi a una cosa o all'altra. Secondo Corina, un modello più completo avrebbe potuto dimostrare che i cerchi delle fate sono il risultato dell'auto-organizzazione delle termiti combinata con il modello di retroazione scala-dipendente della vegetazione.

Costruire questo modello completo si rivelò difficile. «Ci obbliga ad avere una regola per ogni cosa. Non possiamo permetterci spazi vuoti», mi ha raccontato Corina a inizio 2015. «Ti spinge a considerare cose che altrimenti non considereresti mai». Sotto terra, le termiti sgobbavano inosservate nella loro scatola nera. Corina era immersa nella letteratura sull'argomento e comunicava quotidianamente con Juan, in Scozia, mentre il suo gruppo metteva insieme gli aspetti computazionali del modello. Era il più complesso su cui avesse lavorato e si stava confrontando con inconsistenze nel ragionamento sulla retroazione scala-dipendente: l'idea che le piante traessero beneficio dal fatto di essere vicine aveva senso, ma era vero che su larga scala la competizione sopprimeva la crescita? Un'altra domanda era relativa al modo in cui le termiti concentravano le sostanze nutritive nello spazio: ovviamente, riportavano l'erba nel nido, ma in parte la processavano nell'intestino, per esempio rilasciando azoto biodisponibile. Un vero mistero.

«Per me non è una questione di cerchi delle fate», affermò Corina. Voleva capire come meccanismi multipli di formazione di schemi possono interagire su scale diverse. «Mi affascina il modo in cui questi piccoli organismi, parte di ecosistemi confusi e complessi, possono produrre schemi così regolari».

Nel 2017 il gruppo pubblicò un articolo con un modello di come, in tutto il pianeta, animali scavatori quali termiti, formiche e roditori potrebbero interagire con la vegetazione per creare schemi e strutture. Associando i termitai di Africa, Asia e Australia alle analoghe formazioni a tumulo di termitai brasiliani, *mima mounds* della costa nord-occidentale del Pacifico e *heuweltjies* sudafricane, i ricercatori hanno suggerito che molte decine di migliaia di chilometri quadrati di superficie terrestre potrebbero essere stati rimessi in ordine da agenti sotterranei. Nessun architetto potrebbe essere mai riuscito a portare a termine un'impresa del genere: sono state necessarie migliaia di miliardi di mini-menti.

Ora che conoscevo questa relazione tra i minuscoli scavatori e le enormi distese di terra che mi capitava di sorvolare sentivo simpatia per i primi esploratori che guardarono dentro i nidi di termiti e non videro altro che metafore della società umana e prove della naturalità dei diritti dei sovrani. Guardando verso l'interno, non erano riusciti a vedere l'equivalente terrestre delle sfere celesti.

In un termitaio è possibile osservare l'intero ordine della sfera terrestre o, in termini più contemporanei, il progresso dal locale al globale. Si parte dall'universo brulicante di vita dell'intestino delle termiti che assimila l'erba, salendo di scala verso il mondo degli insetti, che scavano e accudiscono la prole nel loro grandioso ordine sociale; ancora più in alto, il mondo delle termiti e i loro funghi, nel nido, dove le comunicazioni avvengono per ondate di elementi chimici e vapore acqueo, e poi ancora, sulla superficie, il mondo delle piante e dei gechi. Ecco una giraffa che mangiucchia una foglia saporita e, ancora più in alto, diventa evidente un tappeto ordinato di fertilità e superfertilità. E, infine, lo sguardo abbraccia un intero pianeta avvolto dall'atmosfera.

Come le giraffe, anche noi ignoriamo i rimescolamenti dei mondi più piccoli e più grandi del nostro, che non possiamo vedere. Antropomorfizziamo o astraiamo queste relazioni in concetti più deboli che possiamo capire: insetti aristocratici, altruismo, competizione, cugini, buoni e cattivi. Questi comportamenti collaborativi, insieme alle capacità (percettive e di inviare segnali) che richiedono, potrebbero essere i costituenti della complessità.

Per un po' di tempo continuai ad avere pensieri recriminatori sulla nostra incapacità di vedere al di là di noi stessi nel vasto universo che ci circonda: noi esseri umani siamo così poco ambiziosi! Ma poi mi capitò di leggere un discorso sul problema della scala in ecologia tenuto da Simon Levin, ecologo di Princeton. E quando lo lessi compresi che siamo noi stessi i soggetti di questo esperimento, e la nostra consapevolezza intermittente è parte di ciò che ci rende umani. Secondo Levin, il mondo ha bisogno di essere studiato su scale multiple di spazio, tempo e organizzazione: non esiste un'unica scala «corretta». In effetti, la scala a cui noi vediamo il mondo è un prodotto del modo in cui ci siamo evoluti e continueremo a evolverci. «L'osservatore impone un pregiudizio percettivo, un filtro attraverso cui il sistema è osservato. Ciò ha un significato evolutivo fondamentale, perché ogni organismo è un «osservatore» dell'ambiente, e adattamenti nella storia della vita come la dispersione e la dormienza alterano le scale percettive delle specie e la variabilità osservata». Per l'essere umano, così come per le termiti, questi limiti sul modo in cui percepiamo il mondo sono il nucleo centrale di ciò che siamo. ■

PER APPROFONDIRE

Spatial Pattern Enhances Ecosystem Functioning in an African Savanna. Pringle R.M. e altri, in «PLoS Biology», Vol. 8, n. 5, articolo e1000377, 25 maggio 2010.

Termite Mounds Can Increase the Robustness of Dryland Ecosystems to Climatic Change. Bonachela J.A. e altri, in «Science», Vol. 347, pp. 651-655, 6 febbraio 2015.

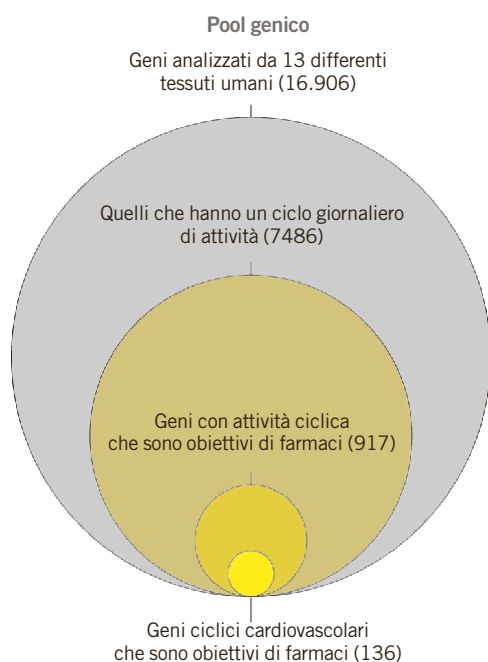
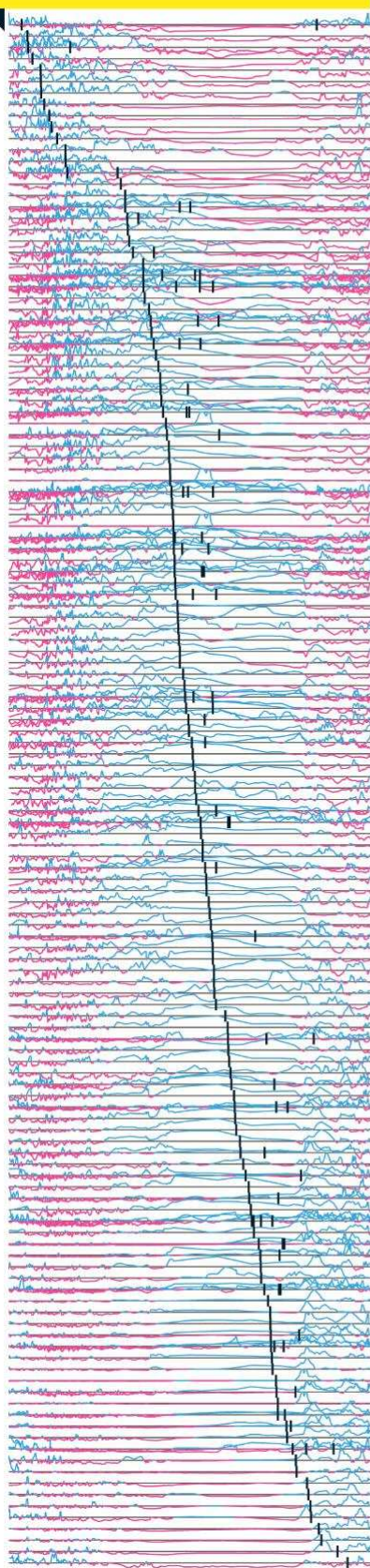
A Theoretical Foundation for Multi-Scale Regular Vegetation Patterns. Tarnita C.E. e altri, in «Nature», Vol. 541, pp. 398-401, 19 gennaio 2017.

La difesa chimica delle termiti. Prestwich G.D., in «Le Scienze» n. 182, ottobre 1983.

L'ora della medicina

Geni con attività ciclica influiscono sull'efficacia dei farmaci

I medici possono anche dire ai pazienti di prendere pillole la mattino o la sera. Ma uno studio ha scoperto che molti geni che codificano per proteine prese di mira da farmaci hanno un ciclo giornaliero di attività diretto dai ritmi circadiani del corpo. L'efficacia di medicine per una tiroide iperattiva, per esempio, può essere massima se la somministrazione avviene quando certi geni sono al massimo dell'attività. Al contrario, prendere farmaci quando i geni sono poco attivi potrebbe essere inefficace. Inoltre, dice Marc D. Ruben, ricercatore al Cincinnati Children's Hospital, che ha diretto lo studio, una tempistica intelligente «potrebbe diminuire la quantità di farmaci necessaria per un effetto desiderato o ridurre gli effetti collaterali a parità di dose».

Mark Fischetti

Espressione di geni cardiovascolari con ciclo di 24 ore

Caso di studio cardiaco

I 136 geni che influiscono su una camera cardiaca, su aorta, arteria coronaria o arteria femorale hanno un ciclo giornaliero (*grafico grande*). C'è uno schema per quando sono molto attivi (*blu*) o poco attivi (*rosa*), e la maggior parte di queste fasi dura per un arco di tempo. Nel caso dei geni cardiaci che non hanno un ciclo giornaliero (*sottoinsieme nel grafico piccolo*), la maggiore o minore attività è casuale e non sostenuta. Alcuni farmaci comuni, come i beta bloccanti per l'alta pressione, agiscono solo per un tempo breve, così potrebbero essere più efficaci se presi quando i geni ciclici sono attivi.

Come leggere i tracciati

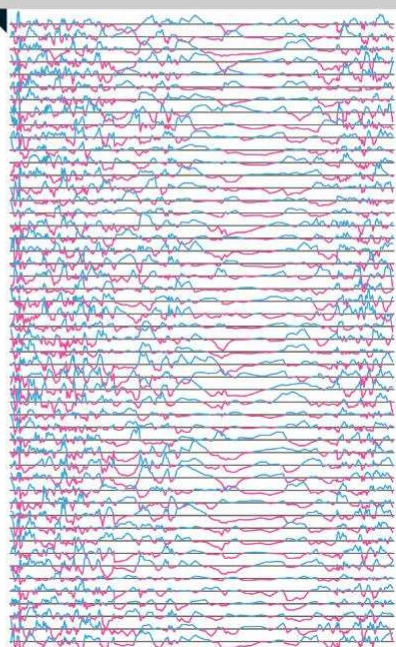
Ogni linea orizzontale rappresenta un gene. La curva irregolare mostra l'attività genetica, o espressione, nelle 24 ore: il rosa indica una bassa attività; il blu un'attività elevata. La barra verticale è il picco della fase giornaliera; si verifica in anticipo per i geni in alto sul grafico grande e in ritardo per quelli in basso.

Alcuni geni influiscono anche su quattro tessuti cardiaci differenti e potrebbero essere espressi in modo diverso in ciascuno di essi (indicato su ogni linea da curve sovrapposte e da più barrette verticali).

Espressione di geni cardiovascolari senza attività ciclica

Grafica di Martin Krzywinski; fonte: *A Database of Tissue-Specific Rhythmically Expressed Human Genes Has Potential Applications in Circadian Medicine*, di Marc D. Ruben e altri, in «Science Translational Medicine», Vol. 10, 12 settembre 2018.

di Paolo Attivissimo

giornalista informatico e studioso
della disinformazione nei media

Il mito della longevità moderna

Rispetto al passato è aumentata la durata media della vita ma gli over 70 non sono mai stati una rarità

L'avete sicuramente sentito dire tante volte: nell'antichità la vita era molto più breve di oggi e si moriva giovani, ma i progressi della medicina ci hanno regalato decenni di vita in più.

Ma è un mito che ha bisogno di precisazioni importanti. È vero che la speranza di vita mondiale è aumentata: secondo i dati delle Nazioni Unite, una persona che nasceva nel 1960 poteva aspettarsi di vivere fino a 52 anni, mentre oggi la media mondiale è 72 anni. In Italia la speranza di vita nel 1880 era di circa 35 anni; oggi l'ISTAT dice che è di 80 anni per gli uomini e quasi 85 per le donne.

Dati come questi possono far pensare che nel Medioevo oppure in epoca romana o greca classica, un cinquantenne sarebbe stato quindi un'anomalia straordinaria: guerre, malattie, infezioni e igiene precaria avrebbero reso quasi impossibile superare così tanti anni di pericolo continuo.

Centenari storici

Ma i dati storici raccontano una situazione differente: per esempio, Esiodo, Platone e Aristotele consigliavano agli uomini di sposarsi non prima dei 25-30 anni. E gli esempi storici di longevità non mancano: Livia, moglie dell'imperatore Augusto, visse fino a circa 86 anni; il marito raggiunse i 75. Un altro imperatore romano, Tiberio, morì a 77 anni. Plinio il Vecchio racconta addirittura di donne centenarie, come la moglie di Cicerone, Terenzia, che sarebbe morta a ben 103 anni. L'imperatrice giapponese Suiko visse fino a 74 anni nel VI secolo dopo Cristo e il faraone Ramsete II campò fino a 90 anni nel 1200 avanti Cristo.

Potrebbe trattarsi di esagerazioni letterarie o di racconti distorti, provenienti da epoche nelle quali il computo esatto dell'età spesso non era così importante e diffuso come lo è oggi: in casi come questi si scopre come stavano davvero le cose ricorrendo ad altre fonti più neutrali, per esempio la burocrazia. Nell'antica Roma molte cariche pubbliche erano accessibili solo a chi avesse superato i 30 o i 40 anni, ed è improbabile che consoli o senatori venissero scelti fra vecchietti decrepiti. Si possono anche guardare i dati dei censimenti e le iscrizioni sulle tombe, che riportano spesso età che sarebbero ragguardevoli anche oggi, ma non includono un aspetto fondamentale che sta alla base del mito della vita moderna allungata.

Donne e bambini

Infatti la speranza di vita è una media: se una famiglia ha due figli e uno muore prima del primo compleanno ma l'altro vive fino a 70 anni, la loro speranza di vita è 35 anni. Per la maggior parte della storia dell'umanità, la mortalità infantile è stata devastante e in molti paesi lo è tuttora.

Per questo è corretto dire che la speranza di vita in passato era molto più bassa di oggi, ma non bisogna pensare che non esistessero i settantenni. Gli esseri umani non sono diventati più longevi; si è allungata la vita media, grazie in gran parte al fatto che muoiono molti meno bambini. Merito della medicina, che permette anche una vecchiaia più sana rispetto al passato.

Un altro aspetto spesso trascurato di questo mito è la differenza fra i sessi: anche senza considerare la mortalità infantile, la speranza di vita una volta superata l'infanzia è cambiata molto più per le donne che per gli uomini.

Gravidanza e parto erano rischi continui e ripetuti e causavano una mortalità femminile elevatissima; oggi non lo sono più. Non per nulla quegli stessi saggi dell'antica Grecia che consigliavano agli uomini età di matrimonio così simili a quelle odierne si premuravano invece di raccomandare che le donne si sposassero fra i 16 e i 20 anni.

Chi s'invaghisce delle presunte paleodiete o propone romantici ritorni all'antico dovrebbe tenerne conto.

di Beatrice Mautino

biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti *Il trucco c'è e si vede* (Chiarelettere, 2018)

Volere bene ai capelli

L'uso di uno shampoo con pH neutro può favorire l'effetto «scopa di paglia»

Nelle settimane passate ho fatto un esperimento involontario sui miei capelli. Avevo in casa uno shampoo per bambini, comprato per farci un esperimento, ma come spesso accade in famiglia, gli esperimenti si mescolano con la vita quotidiana e così lo shampoo è finito sul ripiano della doccia, svolgendo la sua funzione un giorno sì e un giorno no per una quindicina di giorni.

Gli shampoo definiti come delicati generalmente hanno una formulazione semplice, definita dall'assenza di ingredienti «condizionanti», quelli che caratterizzano i balsami, per intenderci, e dalla presenza di tensioattivi, appunto, delicati, cioè poco efficaci. Il risultato è che lavano meno degli shampoo classici per adulti e, a seconda del tipo di capello, possono aver bisogno dell'affiancamento di un balsamo per evitare l'effetto «scopa di paglia in testa». Io il balsamo l'ho usato, ma la scopa di paglia in testa me la ritrovo comunque. I miei capelli sono sfibrati, opachi e iniziano a far capolino le famigerate doppie punte.

Quando me ne sono accorta non riuscivo a capacitarmene. Com'è possibile che uno shampoo per bambini mi rovini i capelli? Non dovrebbe essere delicato? Neutro?

Occhio alla cuticola

Ecco, «neutro» è la parola chiave. E dire che era lì stampigliata sulla confezione a dar valore aggiunto a un prodotto «senza lacrime». Se leggiamo che un prodotto è neutro, pensiamo che sia inerte, che non disturbi «i normali equilibri» del nostro corpo. Ma il termine «neutro» nella sua accezione scientifica significa una cosa ben precisa e cioè che ha un pH di circa 7. La conferma l'ho avuta misurando il pH con una cartina tornasole: pH 7, era neutro davvero. Mentre la stessa misurazione fatta allo shampoo precedente mi ha dato una risposta molto diversa: pH 5. Ecco perché mi ritrovo con questo cespo crespo in testa!

Per capirne il motivo dobbiamo vedere che cosa succede a un capello quando lo laviamo. Lo strato più esterno è chiamato cuticola ed è composta da scagliette disposte come le lastre di pietra dei tetti delle baite di montagna. Queste scagliette sono costituite da strati di cellule morte e rappresentano una barriera di protezione formidabile sia contro i danni meccanici, sia dall'eccesso di umidità. Avendo un sottile strato di grasso all'esterno, sono idrorepellenti e impediscono al grosso dell'acqua di entrare. Una parte, però, riesce a penetrare nello strato sottostante gonfiandolo come una spugna. Le scagliette, a questo punto, sono in tensione ed è sufficiente una minima frizione per farle staccare.

Acido è meglio

Nell'*Handbook of Cosmetic Science and Technology*, il manuale di riferimento per i cosmetologi, compare un esperimento interessante. I ricercatori hanno preso una ciocca di capelli, l'hanno lavata con un normale shampoo e poi l'hanno pettinata, mentre era ancora bagnata, per 700 volte. Le fotografie al microscopio elettronico dei capelli «superstiti» mostrano un paesaggio catastrofico: molte delle scagliette sollevate o distrutte e molte falle nel capello. La situazione migliora se si usa un balsamo che ricopre fisicamente la cuticola esterna, oppure se si usa uno shampoo con un pH «fisiologico» cioè affine al pH dei capelli che è acido (intorno a 3,6).

A questi valori, le scagliette sono ben adese alla superficie sottostante e formano una barriera più efficace nei confronti dell'acqua. Via via che si alza il valore del pH aumentano le cariche negative sulla superficie del capello provocando un maggior attrito tra le fibre che porta, alla lunga, a dare quell'effetto sfibrato che vedo sulla mia testa.

Quindi, se volete bene alle vostre cuticole, armatevi di cartina tornasole e scegliete uno shampoo mediamente acido.

di Dario Bressanini

chimico, divulgatore, gastronomo. Autore di *Contro natura* (Rizzoli, 2015), *La Scienza della Carne* (Gribaudo, 2016)

Sedano a energia negativa

Nessun alimento, compreso questo ortaggio, può dare un contributo negativo all'energia associata al cibo

C'è la diffusa credenza che alcuni cibi, uno su tutti il sedano, contengano «calorie negative», o, più correttamente, diano un contributo negativo all'energia che assorbiamo col cibo. Secondo questa credenza, mangiando sedano crudo consumeremmo più energia di quella che assimiliamo; potremmo quindi dimagrire semplicemente aggiungendo un po' di sedano a ogni pasto. È il sogno di chiunque voglia dimagrire: perdere peso senza togliere nulla di quello che ci piace ma solo aggiungendo un ingrediente magico. Ma è vero?

Prima di rispondere dobbiamo ricordare che cibi diversi hanno un contenuto energetico diverso che misuriamo normalmente in chilocalorie (kcal), cioè migliaia di calorie. I carboidrati contengono 4 kcal/g, i grassi 9 kcal/g, le proteine 4 kcal/g e l'alcol 7 kcal/g.

È energia che serve per mantenere il nostro metabolismo energetico e che il nostro corpo usa per muoversi, scaldarsi, respirare, pensare, sintetizzare nuove molecole e così via. Non facciamoci trarre in inganno dall'assonanza tra calorie e calore: sono solo una misura dell'energia contenuta, che non serve soltanto a scaldarci. Anche stando fermi, sdraiati e senza far nulla, il nostro corpo consuma una gran quantità di energia. È il minimo sindacale che ci serve per vivere, far funzionare i nostri organi e così via, e forse vi stupirà sapere che uno degli organi che consuma più energia è il cervello.

Effetto alimento

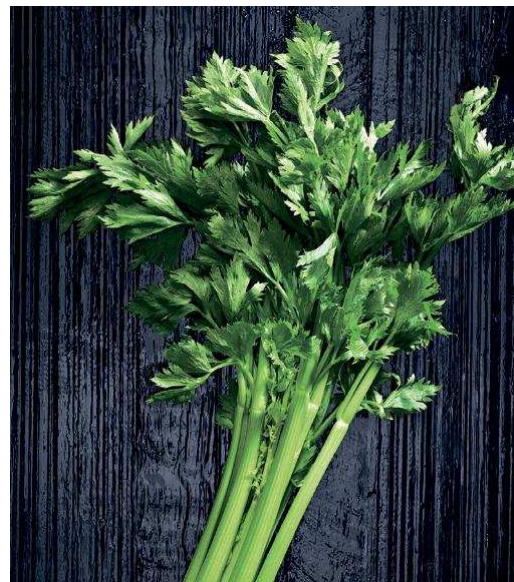
Questo consumo energetico si può misurare sperimentalmente, con qualche difficoltà, e viene chiamato metabolismo basale. Si osserva che subito dopo aver mangiato questo valore aumenta un po'. È un effetto chiamato «termogenesi». L'aumento per un pasto medio è circa del dieci per cento delle calorie contenute nel cibo. In pratica il corpo deve usare un po' di energia per metabolizzare il cibo, immagazzinarla se non viene usata immediatamente, sintetizzare nuove molecole e così via.

L'effetto è diverso a seconda dell'alimento: il corpo a parità di calorie contenute consuma più energia per metabolizzare alcuni cibi rispetto ad altri. I grassi sono i più facili da metabolizzare e richiedono a 0 al 3 per cento delle calorie. I carboidrati dal 5 al 10 per cento, le proteine dal 20 al 30 per cento mentre l'alcol dal 10 al 30 per cento. Dunque, quando mangiamo un cibo che contiene 100 kcal, in realtà a causa della termogenesi ne assimiliamo un po' meno perché una parte è consumata.

Nessuna magia

Tornando al sedano, potrebbe davvero essere un caso in cui l'aumento del metabolismo a seguito del mangiare sedano porti non solo ad annullare il suo contenuto energetico ma addirittura ad andare in negativo, e quindi potenzialmente aiutarci a dimagrire?

Uno studio sperimentale pubblicato nel 2012 ha indagato la questione. A 15 giovani donne, a riposo e a digiuno dalla sera prima, hanno misurato il metabolismo basale. Dopo aver consumato 100 grammi di sedano, corrispondenti a 16 kcal, gli scienziati hanno osservato un aumento del metabolismo. Alla fine dell'esperimento la termogenesi indotta aveva usato 14 delle 16 kcal contenute nel sedano. Quindi niente bilancio energetico negativo purtroppo: non si dimagrisce magicamente mangiando sedano. Però, fanno notare i ricercatori, «l'alto contenuto di fibre e di acqua rende il sedano un buon snack da includere in una dieta per perdere o mantenere peso».

Quindi, se cercate di dimagrire e decidete di sgranocchiare un po' di sedano come spuntino invece di qualche cosa di molto più calorico, va benissimo. Purtroppo in troppi sono alla ricerca di un ingrediente da aggiungere per poter dimagrire senza cambiare nulla delle proprie abitudini alimentari. E questo non è possibile.

Il giusto ruolo. Il sedano contiene parecchie fibre e acqua, dunque ha un basso contenuto calorico e per questo può essere un buon snack da includere in diete per perdere oppure mantenere peso.

fcafotodigital/iStock

Piotr gestisce un corso di nuoto per bambini e quando arriva il momento delle gare Rudy e Alice sono coinvolti come cronometristi

Chiare, fresche e dolci acque...

L'ambiente è ostile. Basterebbe l'assenza di Gaetanagnesi a giustificare l'affermazione, perché la nera micia possiede in massimo grado l'abilità felina di evitare i siti men che tranquillissimi; ma il concetto è ulteriormente ribadito da innumerevoli, evidenti fattori: il tasso di umidità prossimo a quello delle giungle amazzoniche; brusii e acute urla indistinte originate da voci che potrebbero essere sia umane sia di animali sconosciuti; sciabordii in sottofondo, lenti ma continui, come quelli generati dall'avanzare silenzioso e sicuro di una famiglia di alligatori.

«Allora, vogliamo muoverci? Insomma, questi cronometristi! Sono sempre in ritardo!»

«Capo, vedo, sento e non credo ai miei sensi. Te lo dicevo io che non era il caso di lasciarci convincere a venire in un impianto sportivo: in una piscina, poi! E adesso questo... ma è veramente Doc quello che sta sbraitando contro di noi?»

«Pare proprio di sì, Treccia. Da quando gli hanno affidato la gestione del corso di nuoto per bambini sembra essersi montato la testa.»

«Come tutti gli allenatori, del resto. Beh, possiamo dargli questa soddisfazione, per qualche tempo.»

«Per poco, spero. In piscina è vietato fumare e la mia pipa, dopo aver respirato quest'aria per un po', ha un gusto fetente.»

L'ambiente è ancora ostile, anche se improvvisamente meno avventuroso; ma, a dirla tutta, gli elementi più anomali e fuori posto sono proprio Alice e Rudy: in un luogo al coperto dove la tenuta d'ordinanza è limitata a pochi centimetri quadrati di pelle coperta da costumi da bagno, due esseri umani vestiti di tutto punto con tenuta invernale ricordano vagamente la celebre scena di Totò e Peppino alla stazione di Milano.

«Era ora che arrivaste», li apostrofa Piotr col piglio autoritario del *coach* di lungo corso: «Forza, a cronometrare la gara! Alice, tu ti occuperai della corsia due, io della uno e Rudy della tre.»

«Sì, Doc. Certo, Doc. Come vuole lei, Doc... Ma mi spieghi perché solo tre corsie? La vasca non sarà una classica olimpionica a otto corsie, però almeno sei mi sembra di poterle contare...»

«Potrei fare infinite battute sul fatto che più di una corsia per volta non riuscireste a cronometrare, ma noi allenatori siamo gente impegnata con poco tempo da sprecare in chiacchiere con gente come voi. Vi basti sapere che le altre corsie sono inutilizzabili, e dobbiamo accontentarci di tre. E qui nasce il problema che sto cercando di risolvere...» alza gli occhi e li pianta diritti e fermi in quelli di Rudy: «Sentito che cosa ho detto? Problema. Problema da risolvere. Non gongoli già?»

«Problema? E quale sarebbe il problema?» Senza il conforto della pipa, il grafico della pazienza di Rudy viaggia in direzione dell'asse delle ascisse con velocità da chilometro lanciato: «Hai tre corsie, un numero di ragazzini maggiore di tre... Dividili in gruppi, e i tre migliori cronometristi a ovest della linea di cambiamento di data ti forniranno dei tempi precisi al miliardesimo di secondo, no?»

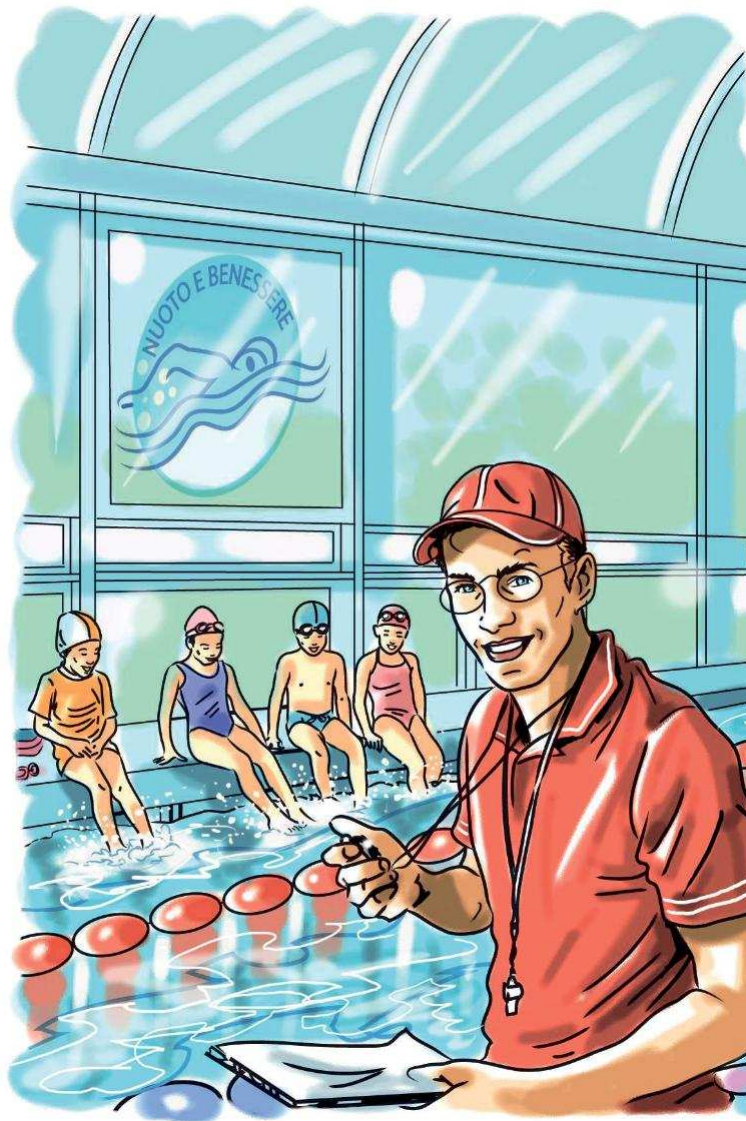



Illustrazione di Stefano Fabbri

Piotr rimane perplesso solo per un istante, forse per verificare mentalmente se è vero che una longitudine Est rispetto al meridiano di Greenwich sia anche occidentale rispetto al meridiano 180, ma torna tosto sulla Terra. Anzi sul bordo vasca.

di Rodolfo Clerico,
Piero Fabbri e
Francesca Ortenzio

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve a febbraio e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

IL PROBLEMA DI DICEMBRE

Il mese scorso i nostri tre eroi erano a un convegno di divulgatori scientifici dove il povero Piotr, troppo lento per scamparla, si è trovato a dover compilare dei «pass» per l'accesso a delle conferenze aperte al pubblico. Le condizioni del problema, esposte nel testo, erano troppe per essere riportate qui per esteso, ma si può riassumere il metodo risolutivo notando che, dalle informazioni fornite, si possono trarre 14 equazioni che legano tra di loro le diverse variabili.
L'approccio risolutivo naturale è pertanto quello ovvio di costruire un sistema di 14 equazioni lineari: è tuttavia piuttosto facile dimenticarsi del fatto che il totale dei partecipanti deve essere dato dal totale delle persone con un solo pass meno il totale delle persone con due pass più il totale delle persone con tre pass meno il totale delle persone con quattro pass. Constatazione, questa, che consente di semplificare decisamente il calcolo.
Alla fine, con o senza scorciatoie, si vede che al convegno sono presenti 14 persone e che Piotr deve compilare 31 pass.

«Non stai considerando la presenza sugli spalti di una pletora di genitori assatanati: tanto per cominciare, per selezionare i tre finalisti, devo (pena la squartatura da vivo, nella migliore delle ipotesi) farli gareggiare tutti lo stesso numero di volte (altrimenti sentirai gli alti lai da coro greco, "Era stanco!" oppure "Certo, quell'altro ha avuto più possibilità!"). Poi, dovranno esserci sempre tre, rigorosamente tre, nuotatori per ciascuna gara di qualificazione...», spiega Piotr.

«Avremmo lamenti da prefiche ben argomentati anche in questo caso?»

«Come, non li senti già, non li immagini? "Quello doveva controllare solo un avversario, mica due!"; o "Facile così, con l'acqua più calma!" e infinite variazioni sul tema.»

Alice alza un sopracciglio perplesso: «Sembra che la genitorialità riesca ad amplificare sensibilmente l'attenzione ai dettagli...»

«Non sperare di farci uno studio accademico sopra, Treccia: notano solo i dettagli a sfavore della prole e solo se particolarmente ridicoli, e se non li notano se li inventano. Infine, ma su questa condizione ammetto di essere d'accordo, due qualsiasi nuotatori non devono essere in acqua insieme in più di una gara.»

«E sei riuscito a conciliare tutti questi vincoli incrociati tra regolamenti sportivi e cure parentali?»

«Beh, innanzitutto ho provato a semplificare il problema, riducendo le variabili. Anziché dieci ragazzini, ho provato a organizzare le qualificazioni soltanto di cinque. Ma tutta quest'umidità probabilmente mi annebbia il cervello, e non ho combinato niente di buono. Guardate qua che cimitero di tentativi...»

Alice e Rudy guardano il blocco note da allenatore che Piotr gli sventola sotto il naso, completamente ricoperto di cancellature.

«Fammi vedere... Essenento, Cilone, Filippo, Diagora, Acanto,... Doc, ma che nomi hanno, i tuoi ragazzini? A parte Filippo, sembrano tentativi di complicare ulteriormente la vita alle nuove generazioni...»

«Oh, no, no... I nomi dei ragazzi sono normali, quelli sono segnalini per me. Al posto dei triti e ritriti A, B, C eccetera, mi sono gingillato con una notazione un po' più classica...»

«...e hai saccheggiato l'elenco di Wikipedia dei vincitori alle Olimpiadi antiche, si vede benissimo,» sogghigna Alice: «Beh, ti ho visto partorire scemenze peggiori.»

Rudy cerca istintivamente la pipa nella tasca della giacca, ma si ricorda del luogo dove si trova e rinuncia immediatamente all'idea. Nell'estrarre la mano, però, scivola fuori dalla tasca un microscopico lapis dimenticato da mesi nelle pieghe dell'abito. Lo raccoglie stupito, lo vede ancora appuntito e pronto alla scrittura. Si rende conto che nell'altra mano tiene ancora il blocco note di Doc, con tutti i vani tentativi cancellati.

«Beh, sembra quasi un complotto del destino... D'accordo, ci proverò io, anche se mi sembrano due situazioni completamente diverse. Vediamo...»

Fallimenti (e successi) terapeutici

La medicina rigenerativa raccontata da uno dei più importanti scienziati del settore

La trama della vita
di Giulio Cossu
Marsilio, Venezia, 2018, pp. 312 (euro 18,00)

Non leggete questo libro se cercate spettacolarizzazioni, promesse e lustrini. Troverete poche storie di successo, ma dettagliati racconti delle sconfitte personali dell'autore e di altri suoi colleghi. Ma, proprio per questo, è un libro illuminante.

Partito da Roma, una carriera prima in diversi laboratori in Italia e poi all'estero (ora a Manchester), Giulio Cossu è uno dei personaggi più importanti sulla scena internazionale della medicina rigenerativa. Da decenni cerca di capire se è possibile curare una malattia come la distrofia di Duchenne usando cellule staminali, correggendo una mutazione genetica che non permette la produzione di una proteina fondamentale (la distrofina) per il funzionamento dei muscoli. Purtroppo, i suoi sforzi sono stati finora senza successo dal punto di vista terapeutico, anche se hanno contribuito in maniera fondamentale alla conoscenza della malattia e dei meccanismi di sviluppo fisiopatologico delle fibre muscolari. Inoltre, Cossu ha partecipato ad alcune battaglie di civiltà, battendosi per esempio contro le limitazioni alla libertà e alla ricerca introdotte Legge 40/2004 sulla procreazione medicalmente assistita.

In questo libro racconta la sua storia personale, ma all'interno della storia della medicina rigenerativa, composta da due grandi filoni: le terapie cellulari e le terapie geniche. Entrambi – sempre più spesso in combinazione – hanno registrato fallimenti e successi. Questi ultimi riguardano per esempio le terapie cellulari per la rigenerazione della cornea messe a punto a Modena da Graziella Pellegrini e Michele De Luca, o le terapie geniche per alcune malattie del sistema immunitario, realizzate da Claudio Bordignon a Milano.

Cossu spiega molto bene, in maniera chiara e mai noiosa, perché raccontare i successi è altrettanto importante che analizzare – senza nascondere – gli episodi negativi. Il risultato che non corrisponde all'ipotesi è parte integrante del metodo scientifico, e quindi della medicina. Tuttavia – ci avverte l'autore – la medicina ha bisogno di cautele ulteriori: la sperimentazione sui pazienti va effettuata solo quando sappiamo tutto o quasi quello che succede in laboratorio. Quindi a partire dalle molecole, si devono passare molti altri livelli di complessità prima di trattare un essere umano. Uno dei motivi riccorrenti di questo testo è costituito dalle critiche nei confronti dei ricercatori che non usano certe cautele e promettono soluzioni là dove invece esistono ancora tanti interrogativi.

Purtroppo, proprio le cellule staminali sono lo strumento preferito dai truffatori che, sulla base delle promesse mediatiche di alcuni, non si sono fatti scrupoli di offrire pseudoterapie senza fondamento. In Italia, Davide Vannoni, quello di Stamina, è stato fermato, purtroppo però all'estero prosperano cliniche private che millantano terapie contro qualsiasi cosa, dalla calvizie al morbo di Parkinson. Giustamente, Cossu esprime forti critiche di fronte a un sistema di ricerca e istruzione che costringe a cercare visibilità mediatica e abbassare le soglie di qualità per motivi economici, a fronte di un pubblico che perde fiducia nei confronti degli esperti istituzionali. Si creano quindi circoli viziosi tra scienza, comunicazione e società, con i ricercatori costretti a trovare spazio in un'arena mediatica a cui sono poco avvezzi, e con pochi giornalisti in grado davvero di contribuire alla comprensione del pubblico.

Questo libro racconta le avventure scientifiche e le condizioni in cui si produce la ricerca, nei laboratori e all'esterno di essi, offrendo prospettive ad ampio raggio essenziali a chi vuole capire come funziona oggi la biomedicina (e non solo).

Mauro Capocci

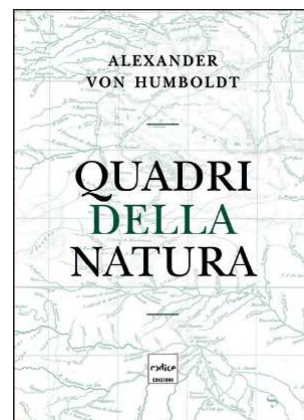
L'opera che inventò il paesaggio

Ripubblicato un classico dell'autore che ispirò Darwin

Sulla piccola mensola della sua cabina nel brigantino *HMS Beagle*, al tempo del viaggio intorno al mondo che gli suggerì le sue osservazioni più importanti, Charles Darwin aveva con sé i volumi della *Personal Narrative* di Alexander von Humboldt. Li aveva stipati tra i bagagli insieme a pochi altri libri su consiglio del botanico John Henslow. Lo sguardo acuto di Humboldt, considerato uno tra i naturalisti più influenti e importanti tra il XVIII e il XIX secolo, permise al giovane Darwin di affinare il metodo di osservazione dell'ambiente naturale, insegnandogli a trarre conclusioni da un'analisi completa di molti fattori, senza il timore di valicare i confini tra le discipline scientifiche.

Humboldt aveva la dote di riuscire a ricondurre il molteplice che gli restituivano le sue attente osservazioni all'unità del sistema sottostante. «Uno sguardo d'insieme sulla natura, la verifica dell'azione combinata delle sue forze», per dirla con le parole dello scienziato, che infatti è considerato tra i fondatori della geografia e delle scienze naturali moderne, ma anche il primo a concepire in termini nuovi il concetto di paesaggio come insieme di elementi interconnessi. Un ecologo *ante litteram*, quindi, ma è difficile trovare una branca degli studi naturalistici che non mostri il suo contributo.

A 210 anni dalla prima pubblicazione, Codice Edizioni ripropone una delle opere più influenti di Humboldt: quei *Quadri della natura* che costituiscono un classico della prosa scientifica e della letteratura. Lo stile visivo e immaginifico di Humboldt sembra dipingere gli scenari naturali sotto gli occhi del suo lettore, trasportandolo idealmente tra i paesaggi del Centro e del Sud America in cui aveva viaggiato. I quadri di Humboldt sono fatti di parole, ma l'editore ha scelto di accompagnarli a una ricchissima iconografia, a cura di Elena Canadelli, tratta opportunamente dalle altre opere dell'autore e dei suoi collaboratori. Un aiuto importante per inquadrare l'opera e la sua influenza sullo sviluppo della scienza sono le due introduzioni a cura del geografo Franco Farinelli e dello storico e filosofo della biologia Telmo Pievani.

Anna Rita Longo

Quadri della natura
di Alexander von Humboldt
Codice Edizioni, Torino, 2018,
pp. 538 (euro 65,00)

Le tante forme di Kurt Gödel

Un ritratto del genio della logica e della matematica

«Scopritore della più significativa verità matematica del secolo: incomprensibile al profano, rivoluzionaria per il filosofo e il logico.» Così veniva descritto Kurt Gödel nel 1952 dalla Harvard University in occasione del conferimento di una laurea *honoris causa*. Forte del suo passato da logico matematico, Piergiorgio Odifreddi racconta con dovizia di dettagli il percorso che condusse Gödel a formulare nel 1930 i due teoremi di incompletezza, il radicale compimento della crisi dei fondamenti che da qualche decennio agitava matematici, logici e filosofi.

I risultati di Gödel, e le sottigliezze dei suoi argomenti, risultarono poco comprensibili in realtà non solo ai profani, ma anche a tanti matematici e filosofi. Tra i primi a comprenderne la portata fu il grande matematico John von Neumann, che alla fine degli anni venti lavorava sugli stessi problemi di Gödel. E mentre filosofi come Ludwig Wittgenstein e Bertrand Russell non furono in grado di cogliere appieno il significato dei suoi teoremi, i matematici David Hilbert ed Ernst Zermelo, che tanto si erano battuti per dare solide fondamenta alla matematica, non la presero bene. La ricostruzione di Odifreddi, dalla partecipazione del giovane Gödel al circolo di Vienna fino agli anni trascorsi a Princeton dove usava intrattenersi in lunghe passeggiate con Albert Einstein, rappresenta un ampio affresco della cultura scientifica della prima metà del Novecento, attraversata da un cambio di paradigma che tra l'altro pose anche le premesse teoriche per la rivoluzione informatica.

«Quando sono entrato nel campo, la logica era per il 50 per cento filosofia e per il 50 per cento matematica. Oggi è diventata per il 99 per cento matematica, e solo l'uno per cento filosofia. E anche quell'uno per cento è cattiva filosofia.» Sono parole di Gödel, per il quale però la riflessione filosofica ha giocato un ruolo dominante nella seconda parte della vita, dal lavoro sui modelli cosmologici della relatività generale fino all'aggiornamento in chiave logica della prova ontologica dell'esistenza di Dio: i temi a cui sono dedicati capitoli del libro, che ci regalano il ritratto di un genio multiforme da conoscere più da vicino.

Marco Motta

Il dio della logica
di Piergiorgio Odifreddi
Longanesi, Milano, 2018,
pp. 270 (euro 17,00)

I vantaggi della salute pubblica

Storia ed evoluzione del nostro Servizio sanitario nazionale

«Salute e mercato sono due categorie completamente diverse le cui strade non dovrebbero incrociarsi mai». Della sanità italiana molti si lamentano, a volte con ragione. A volte meno, ricorda Remuzzi in questa appassionata quanto informata difesa del Servizio sanitario nazionale (SSN): che troppe volte diamo per scontato, scordandoci di quanto più drammatica possa essere l'esperienza di malattia anche in paesi più ricchi, ma privi di una sanità concepita per curare, non per fare profitto. Anche le liste d'attesa, per esempio, non sono sempre un male da combattere a ogni costo. Ma anche quando abbiamo ogni ragione per lamentarci, o ci preoccupiamo di come rendere sostenibile il sistema in futuro, la soluzione non verrà dalla «seconda gamba» del privato. «Questo libro non è scritto per gli addetti ai lavori e forse nemmeno per i politici, è un libro scritto per la gente, per chi aspetta ore al pronto soccorso chiedendosi perché». A loro Remuzzi, «raccontando quello che succede quasi ogni giorno a chi si occupa di ammalati e di malattie», narra come è nato il SSN e come è cambiato. Analizza i motivi per cui non sempre funziona come dovrebbe. Sfata false concezioni, come appunto quelle sulle liste d'attesa. Ma passando dal «New England Journal of Medicine» a Karl Marx, dai rapporti dell'Organizzaione mondiale della Sanità ai racconti di un dializzato, sfata anche le false soluzioni proposte. Prima fra tutte, ma non sola, la privatizzazione. «Se si fa dialisi nei centri *for profit* si muore di più». E i privati non promuovono certo la prevenzione, chiave di una salute sostenibile.
Sono solo alcuni dei tanti esempi per cui le risposte vanno cercate altrove. Per fortuna le soluzioni non mancano, e Remuzzi ne illustra parecchie. «Per ridurre i costi, il miglior approccio è spesso spendere di più su alcuni servizi per ridurre il bisogno di altri», spiega prendendo a prestito le parole di un altro esperto, e illustrando in concreto cosa ciò significhi. La sfida di una sanità pubblica efficiente e sostenibile, insomma, si può vincere. Lo stanno facendo in Bangladesh, Etiopia, Kirghizistan. Perché non dovrebbe essere possibile da noi?

Giovanni Sabato

La salute (non) è in vendita
di Giuseppe Remuzzi
Laterza, Bari-Roma, 2018, pp. 152 (euro 12,00)

Un fisico da Oscar e da Nobel

Kip Thorne racconta la sua collaborazione con *Interstellar*

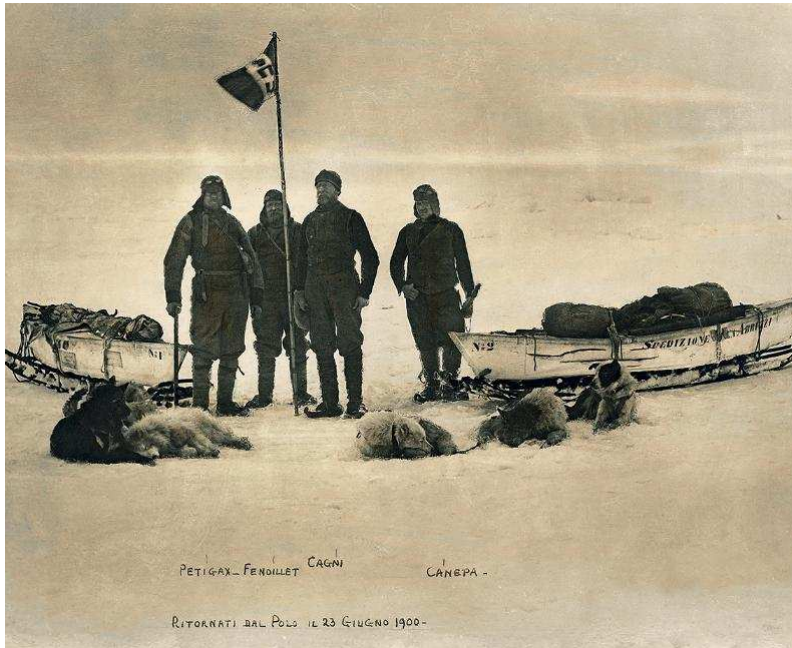
Sul film *Interstellar* (2014) il pubblico si è diviso: da una parte gli estimatori, che non hanno esitato a gridare al capolavoro, e dall'altra i detrattori, che nutrivano sospetti verso l'uso di oggetti scientifici complessi come il tesseratto o l'orizzonte degli eventi di un buco nero. Comunque la pensiate, non c'è miglior risposta alle vostre curiosità che leggere il *making of* scientifico uscito dalla penna dello stesso super consulente, il fisico statunitense Kip Thorne, che nel frattempo, nel 2017, ha anche ricevuto il Nobel per il suo contributo alla scoperta delle onde gravitazionali. Il libro, quindi, non è un classico della divulgazione dell'astrofisica, ma il racconto di come si possa passare da un'idea astratta («facciamo un film scientificamente accurato, che rispetti le leggi della fisica») a un *blockbuster* che ha ricevuto il premio Oscar per gli effetti speciali.
Thorne racconta come ha interagito con ognuna delle persone coinvolte nella sua veste di «fonte per la scienza» di *Interstellar,* e di come abbia dovuto ingegnarsi, per esempio, per calcolare a che velocità doveva ruotare il pianeta Miller, e a che distanza, per impedire che venisse distrutto dalla forza gravitazionale di Gargantua, il gigantesco buco nero protagonista del film, per dare consistenza alle scelte della trama. A proposito di Gargantua, la sua resa grafica in altissima risoluzione è un oggetto di studio scientifico, perché costruita anche da un punto di vista quantitativo in modo da rispettare ciò che sappiamo sui buchi neri. Il risultato è che il lavoro con il team di computer grafica ha generato uno studio pubblicato da «Classical and Quantum Gravity».
Ma sono tanti gli spunti di interesse scientifico della realizzazione del film, come per esempio i paradossi temporali che si innescano per gli spostamenti interstellari, o la presenza su di un pianeta di onde che non si rompono mai e somigliano a solitoni. Certo, talvolta bisogna fermarsi e riflettere, ma, ricorda Thorne, «è tipico della scienza: richiede riflessione e talvolta occorre meditarci sopra a lungo, un lavoro che alla fine può risultare gratificante».

Marco Boscolo

Viaggiare nello spaziotempo
di Kip Thorne
Bompiani, Milano, 2018, pp. 496 (euro 25,00)

Capitani coraggiosi
Museo delle culture (MUDEC) di Milano
Via Tortona, 56
Fino al 10 febbraio - www.mudec.it

Il fascino delle terre sconosciute

Una mostra a Milano racconta l'avventura umana dell'esplorazione nel XX secolo

Una delle più grandi avventure intellettuali della storia della scienza, quella della teoria dell'evoluzione, in fondo comincia con il viaggio a bordo del brigantino *Beagle*, un evento che inserisce Charles Darwin nella tradizione plurisecolare dei viaggi di scoperta. Ma se la stagione ottocentesca è caratterizzata dall'esplorazione di territori ancora fuori dalle mappe europee, sotto una forte spinta colonialista, durante il Novecento l'indagine geografica sul campo cambia profondamente. E l'esploratore del futuro che competenze avrà? Quali confini cercherà di raggiungere? Sono alcune delle domande che suscita la mostra dedicata all'avventura umana della scoperta tra il 1906 e il 1990 ospitata al Museo delle culture di Milano.

Tramite fotografie, filmati e cimeli di celebri spedizioni, i visitatori sono messi a confronto con le trasformazioni del viaggio e dell'esplorazione nel secolo scorso. Nel corso del XX secolo le nuove terre da cartografare, i nuovi popoli da incontrare diventano sempre meno e il turismo erode progressivamente l'esclusività del viaggio. Ai professionisti dell'esplorazione e agli scienziati restano territori sempre più difficili da raggiungere: le vette delle montagne, le profondità degli abissi, le grotte, ma soprattutto il cielo e lo spazio. Esplorazioni che sono accompagnate dall'avanzamento cumulativo delle conoscenze scientifiche. La conquista italiana del K2 nel 1954, qui celebrata con fotografie inedite di recente individuazione, è stata possibile anche per l'avanzamento tecnologico, grazie all'impiego dalle soluzioni più innovative, comprese le suole degli scarponi realizzate in un nuovo materiale, il Vibram.

Nel Novecento gli alpinisti hanno cominciato anche a occuparsi del sottosuolo, in quello che Francesco Salmojraghi, primo presidente del Club alpino italiani (CAI) milanese, ha definito «alpinismo sotterraneo». La speleologia ha fin da subito interessato ingegneri e scienziati, attirati dalle sfide che le grotte rappresentano, specialmente se sono sfide straordinarie come quelle del Complesso del Releccio, in Lombardia, che raggiunge quota -1313 metri rispetto all'ingresso.

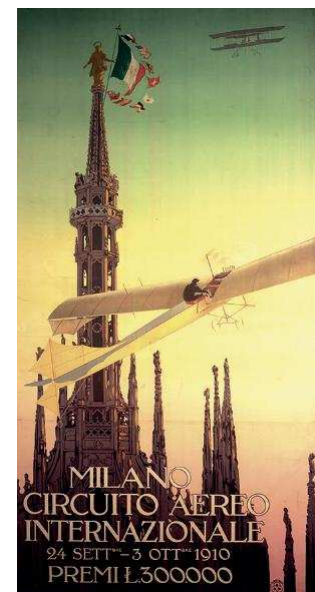
Ma qual è il futuro della geografia? Abbiamo già conquistato la Luna e abbiamo puntato il mirino su Marte, perciò lo spazio sarà il protagonista delle prossime imprese.

Marco Boscolo

Al MUDEC. Spedizione italiana al Polo Nord del 1900 (*a sinistra*); manifesto del film *Italia K2* (1955) e di una gara per aviatori tenuta in Italia nel 1910.

Cortesia Museo nazionale della montagna/CAITorino, Torino (in alto a sinistra e a destra); cortesia Civica raccolta delle stampe Achille Bertarelli, Milano (*in basso a destra*)

Prossimo numero

a febbraio

Indietro nel tempo

di Dan Coe

Usando le lenti gravitazionali, l'esperimento RELICS ha individuato alcune delle galassie più antiche dell'universo, tra cui una di circa 13,3 miliardi di anni fa, aprendo una finestra su un periodo finora sconosciuto della storia del cosmo.

Dossier: la scienza delle disuguaglianze

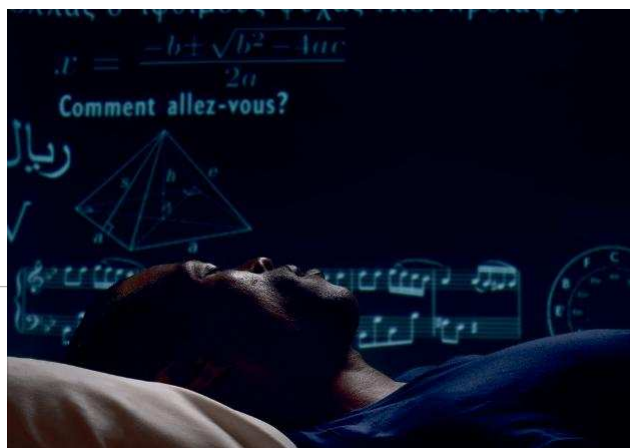
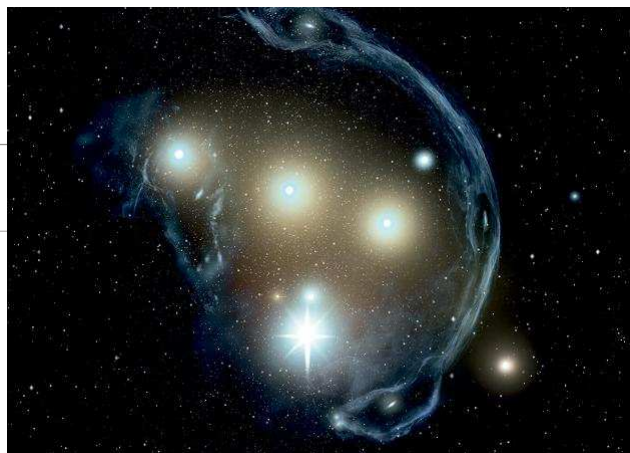
di Joseph E. Stiglitz, Robert M. Sapolski, Virginia Eubanks e James K. Boyce

Gli effetti delle crescenti disuguaglianze economiche colpiscono negativamente ogni aspetto del benessere umano, e non risparmiano nemmeno la salute del pianeta.

Dormendo si impara

di Ken A. Paller e Delphine Oudiette

La recente scoperta che mentre dormiamo il nostro cervello rimane attivo, riattivando memorie specifiche, potrebbe aiutare gli scienziati a mettere a punto programmi di apprendimento nel sonno per accelerare l'acquisizione di nuove conoscenze e abilità.

Ron Miller (*galassie*); Hannah Whitaker (*sonno*)

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*), Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*), Andrea Mattone (*grafico*), Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione:
Andrea Lignani Marchesani
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano,
telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati (D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - dicembre 2018

ISSN 2499-0590

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief and Senior Vice President
Mariette DiChristina

President
Dean Sanderson

Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Silvio Ferraresi*: La rabbia nel cervello;* Eva Filoramo: *Uscita d'emergenza, La vera paleodieta, Le termini e i cerchi delle fate;* Daniele Gewurz*: Il problema insolubile, La geometria contro l'inganno dei collegi;* Alfredo Tutino: *Dieci tecnologie emergenti per il 2019.*

ABBONAMENTI E ARRETRATI
GEDI Distribuzione S.p.A.

Per informazioni sulla sottoscrizione di abbonamenti e sulla richiesta di arretrati telefonare al numero 0864.256266 o scrivere a abbonamenti@gedidistribuzione.it o arretrati@gedidistribuzione.it
Fax 02.26681986.

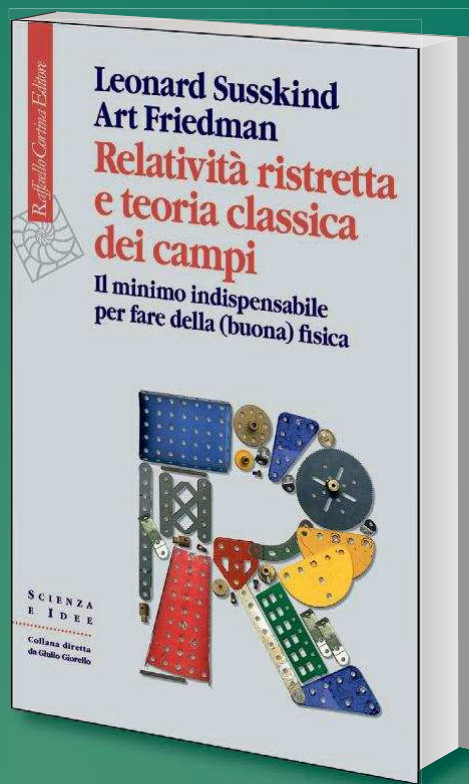
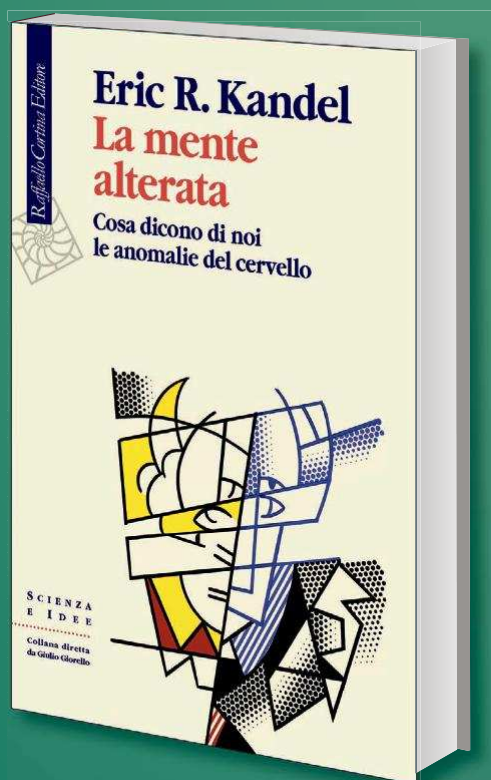
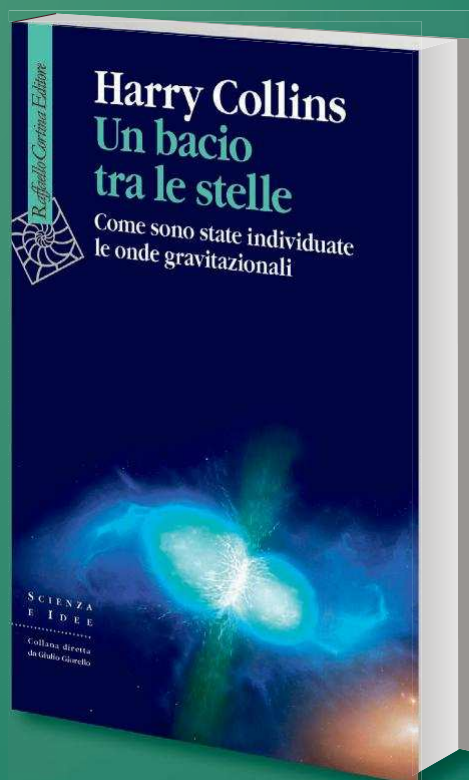
Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8467 del 21/12/2017

Raffaello Cortina Editore

Paul A.M. Dirac
La bellezza come metodo

Scienza e Idee
Collana diretta da Giulio Giorello

«Un testo che illustra splendidamente l'estetica matematica di Dirac»
Graham Farmelo

Le grandi conquiste della fisica spiegate con chiarezza esemplare

Il premio Nobel Eric Kandel ci guida in un viaggio ai confini della mente

La scoperta che ha cambiato l'astronomia

www.raffaellocortina.it